

基于各向异性高斯曲面拟合的星点质心提取算法

王 敏^{1,2}, 赵金宇^{1*}, 陈 涛¹

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

摘要 恒星识别以及卫星目标检测识别是空间监视系统的重要应用之一。由于星图图像点目标成像的特点以及大量背景恒星的干扰, 星图中用于目标识别的特征难以提取, 因此目标的位置是实现目标识别的关键特征。高斯曲面拟合方法是使用较为广泛的目标质心提取算法之一, 通过理论分析和实验表明传统高斯曲面拟合方法对运动卫星的定位存在较大误差。为此, 提出了各向异性的高斯曲面拟合模型, 该模型通过使用两个不同的高斯模糊参数和旋转因子, 可以捕捉目标不同方向的各异特征, 适合卫星由于运动造成的随机方向模糊。仿真实验和真实数据实验表明, 本文方法的总体定位精度可分别达到 0.008 和 0.04, 并能够准确提取星图目标的质心, 相比传统方法有较大改善。

关键词 机器视觉; 图像处理; 质心提取; 高斯曲面拟合; 各向异性; 定位精度

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0515006

Center Extraction Method for Star-Map Targets Based on Anisotropic Gaussian Surface Fitting

Wang Min^{1,2}, Zhao Jinyu¹, Chen Tao¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The star and satellite target detection and recognition are one of the important applications of space surveillance system. Because of the characteristic of point target imaging of the map image, and a large number of the interference of background stars, the feature extraction of the map for target recognition is difficult, so the location of the object is the key characteristics to realize target identification. Gaussian curved surface fitting method is one of the target centroid extraction algorithms to be used widely. Theoretical analysis and experiment show that the traditional Gaussian curved surface fitting method of the satellite motion poisoning has much error. So, the anisotropic Gaussian surface fitting model is put forward, and the model by using two different Gaussian blur parameters and rotation factors to capture target of anisotropic characteristics of different directions, which is suitable for the fuzzy random direction caused by the satellite movement. Simulation experiments and real data test show that the overall positioning accuracy of this method can achieve 0.008 and 0.04, respectively, which is able to accurately extract the map target centroid, and improved greatly than that of the traditional methods.

Key words machine vision; image processing; centroid extraction; Gaussian curved surface fitting; anisotropic; positioning accuracy

OCIS codes 150.1135; 100.2000; 120.4820; 150.0155

收稿日期: 2016-11-22; **收到修改稿日期:** 2017-01-20

基金项目: 国家 863 计划 (2011AAXX2035)、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目 (065X32CN60)

作者简介: 王 敏 (1989—), 女, 博士研究生, 主要从事空间目标自动识别, 图像处理方面的研究。

E-mail: wmin0805@163.com

导师简介: 陈 涛 (1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密跟踪测量技术方面的研究。

E-mail: chent@ciomp.ac.cn.

* **通信联系人.** E-mail: zhaoyj@ciomp.ac.cn.

1 引 言

空间监视系统是进行空间控制不可或缺的一种重要手段,目前的空间目标监视主要基于地基观测方式实现,多采用地基光学望远镜、雷达探测器及无线电信号探测器组成的监视网,对空间目标进行探测和跟踪。空间监视系统的监视目标(空间目标)主要是指卫星,也包括各种空间碎片^[1],如进入空间轨道的助推火箭、保护罩和其他物体,还包括进入地球外层空间的各种宇宙飞行器,如彗星和小行星。空间目标检测识别是根据拍摄到的序列星图对空间目标进行搜索定位的过程,是空间信息应用研究的重要方向,是空间态势感知的重要组成部分,也是确保载人航天安全的重要技术保障。

由于大视场地基天文光电观测系统口径小、视场大,受相机分辨率的限制,空间目标在焦平面上几乎为点目标成像,而背景恒星由于距离地球很远,三角视差绝大部分小于 $0.01''$,其成像也为点目标成像,而且都表现为暗弱的点目标。由于目标和背景恒星的点目标成像特性,难以利用目标的灰度特征、区域特征、形状、颜色以及纹理等视觉特征对星图目标监视识别,因此星图目标的位置特征成为星图目标识别的关键特征。比如利用恒星的位置信息可以通过星库匹配的方式进行恒星识别^[2-3];利用卫星位置信息可以估算卫星的轨道信息,进而进行卫星识别和轨道预测等。

然而对星图目标进行精确定位是困难的。由于传感器的硬件限制、透镜的散射作用以及大气的干扰,星图目标成像过程具有点扩展函数(PSF)模糊^[4]效应,导致恒星在星敏感器中成像结果是一个以恒星位置为中心的斑点,也就是图像中相邻像素中都有一定的灰度分布,并且灰度值随远离中心位置很快地降低。目前星图目标中心定位常用算法包括灰度质心法(GC)^[5-7]、加权灰度质心法(WGC)^[8-10]、高斯曲面拟合法(GSF)^[11-13]和抛物面拟合法(PSF)^[11]等。质心法可以看成是以灰度为权值的加权方法^[14],只有对灰度对称分布的目标才能获得理想的效果,事实上,由于光学成像带来的离轴星像具有非对称性,因此使用该算法的单个星像的位置中心精度难以获得很大提高;加权灰度质心法可认为是一种改进的质心法,对不同的像素设置不同权值,权值的绝对值随像元到中心坐标的距离增大而增大,而在中心位置及其附近的像素灰度值较大,信噪比较高,因此加大了中心像素的权重,改善了质心法受噪声影响大的问题;高斯曲面拟合法,从星图成像原理出发,利用高斯函数模拟成像过程的PSF,进而进行目标中心定位,该方法是一种较为精确的目标中心定位算法,同时具有较高的稳定性,是目前最为常用的目标质心提取算法;抛物面拟合法则是高斯曲面拟合法的一种简化算法,精度和稳定性相对较差,实际较少采用。

高斯曲面拟合法是目前精度较高的质心提取算法,但由于其模型描述的是点目标扩散效应,因此只适合呈近圆形斑点的目标定位,比如星图中恒星目标。而星图中的卫星目标,由于运动效应,表现出一定的线状特征,因此传统的高斯模型并不适合卫星目标的质心提取。为此,本文提出了一种基于各向异性高斯曲面拟合的质心提取方法,该模型利用了两个不同的高斯模糊参数描述目标的线性特征,同时引入旋转因子解决卫星目标运动方向的随机性。传统的高斯曲面拟合模型是本文模型在两个高斯模糊参数相等且旋转角度为零情况下的一个特例。因此各向异性高斯曲面模型既适用于恒星目标的定位,同时又适用于运动卫星的精确定位。

2 基于各向异性高斯曲面拟合的星图目标质心提取方法

2.1 基于高斯曲面拟合的质心提取方法分析

高斯曲面拟合方法确定目标质心的前提是:目标在图像中表现较亮的斑点,受传感器的硬件限制、成像特性以及大气的干扰,成像过程具有PSF模糊效应。受PSF模糊的影响,目标表现出从中心四周灰度逐渐降低的弥散效应,如图1(a)、(b)所示;受成像传感器及成像条件的影响,点目标在图像中表现为从中心向四周灰度逐渐降低的斑点,图中红色斑点为目标位置。

高斯曲面拟合方法将成像过程的PSF使用高斯函数拟合,假定 $f(x, y)$ 为图像 I 中位于 (x, y) 的亮度值, (x_0, y_0) 为目标中心,则目标的弥散处的像元亮度可用如下模型表示:

$$f(x, y) = A \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\}, \quad (1)$$

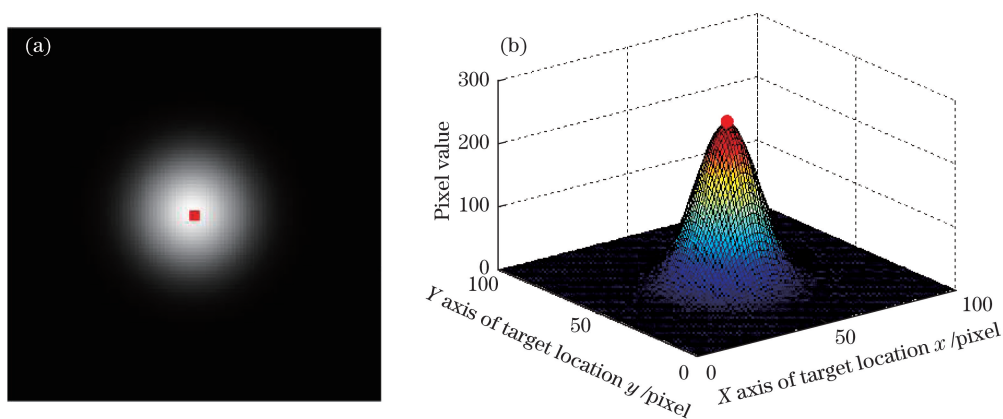


图 1 高斯曲面拟合确定目标质心

Fig. 1 Gaussian surface fitting to determine target centroid

式中 A 为固定系数,可认为等于目标中心亮度值; σ 为高斯函数均方差,由成像条件和参数决定,影响 PSF 模糊效应的程度。

利用高斯曲面拟合的方法确定目标质心的过程就是利用目标及其周围像素通过(1)式分别求解 A 、 σ 以及 (x_0, y_0) 。因此至少需要 4 个目标像素才可求解,一般而言,目标及其弥散的周围像素多于 4 个,此时采用最小二乘法求取使得均方误差最小的参数。最终 (x_0, y_0) 就是目标的质心。

高斯曲面拟合方法求解目标质心比其他方法具有更高的精度^[15-16],并且可以定位至亚像素精度。但从图 1(a)、(b)以及(1)式可以看出,传统高斯曲面拟合法适合用于呈近圆形的目标的质心的计算,对于呈条状的目标,模型本身并不适合。

在星图中,由于深空背景较暗以及卫星目标运动速度快,在望远镜的成像积分时间内,运动目标往往会有一段明显位移,导致运动目标在星图中呈现一定的线性特征,如图 2 所示。图 2 是一幅真实图像,图中红框部分即为运动卫星目标,可以看出目标呈现明显的条状特征,成像特性与(1)式并不符合。此时如果使用传统的高斯拟合方法计算目标的质心,则会有较大误差。为此,提出了各向异性的高斯曲面拟合方法。

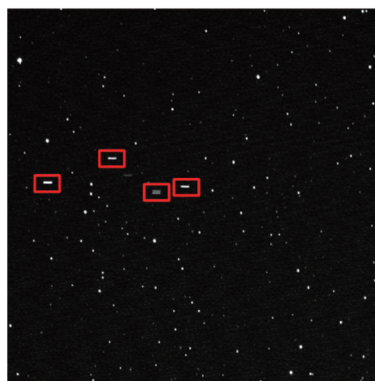


图 2 实际星图

Fig. 2 Real map

2.2 各向异性高斯曲面拟合方法

在星图中,目标主要包含恒星目标和运动卫星两大类,恒星目标由于静止,因此表现为近圆形的斑点,如图 3(a)所示。运动目标由于在成像积分时间内有一定的位移,因此表现出一定的线性特征,考虑到卫星运动方向的随机性,其运动轨迹指向具有不确定,可能表现为图 3(b)~(d)或者其他角度的模糊。由于 PSF 效应,目标呈现中间向周围亮度逐渐降低。

为了对运动目标质心进行准确提取,需要解决两个问题:1)运动目标具有线性特征,模型需要定量表达目标的线性程度;2)目标运动方向具有随机性,模型需要适应不同角度的目标运动方向。

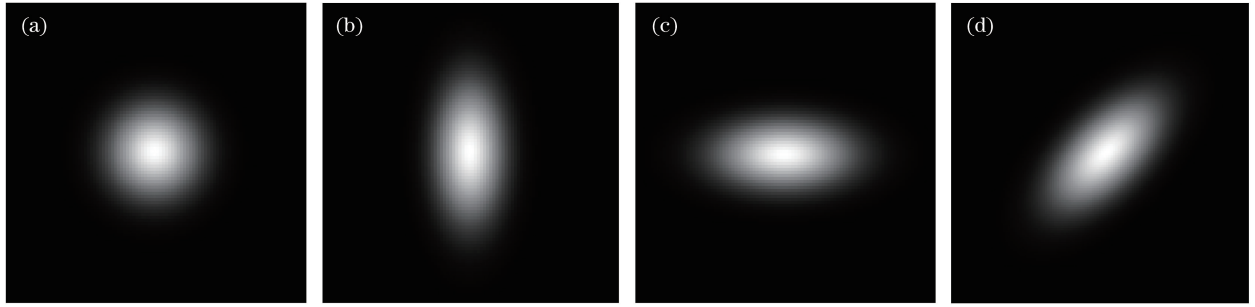


图 3 星图目标成像特征示意图。(a)恒星目标呈圆形;(b)卫星垂直方向运动;(c)卫星水平方向运动;(d)卫星 45° 方向运动
Fig. 3 Schematic of map target imaging. (a) Star target into a round shape; (b) satellite in vertical direction;
(c) satellite in horizontal direction; (d) satellite in 45° of direction

在传统高斯曲面拟合模型中,如(1)式所示, σ 控制着 PSF 效应的程度,也就是目标弥散的大小,为了描述目标的线性特征,可以对目标的 x 方向和 y 方向分别采用不同的 σ 参数,这样可以使得目标在 x 方向和 y 方向分别具有不同的扩散特性,从而形成线性特征。

首先,不考虑运动方向问题,使用 x 方向和 y 方向不同扩散参数的质心提取模型为

$$f(x, y) = A \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x - x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{\sigma_y^2} \right]\right\}, \quad (2)$$

式中 A 为固定系数,可认为等于目标中心亮度值; σ_x 和 σ_y 分别为 x 方向和 y 方向的高斯函数均方差, (x_0, y_0) 为目标质心。

考虑到目标的运动方向的随机性,为了能对目标不同方向的运动具有适应性,引入了旋转坐标系。不失一般性,以逆时针 45° 方向运动为例,原始坐标系 x - y ,逆时针旋转 45° 后形成新的坐标系 \hat{x} - \hat{y} 。在新坐标系下,运动目标的运动方向为水平方向,如图 4 所示。对其他情况的运动方向,只需调整相应的旋转角度即可。

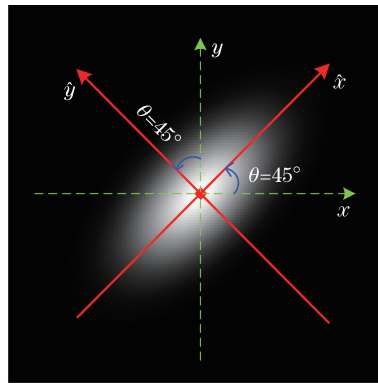


图 4 运动卫星在旋转坐标系下的运动方向
Fig. 4 Movement direction of the satellite in rotating coordinate system

取逆时针旋转角度 θ 为正,易得原始坐标到新坐标系下的旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

由(3)式可知,原始坐标为 (x, y) 时,新坐标系下的坐标为 $(x \cos\theta + y \sin\theta, x \sin\theta - y \cos\theta)$ 。将新坐标带入(2)式,可得:

$$f(x, y) = A \exp\left\{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{[(x - x_0) \cos\theta + (y - y_0) \sin\theta]^2}{\sigma_x^2} + \frac{[(x - x_0) \sin\theta - (y - y_0) \cos\theta]^2}{\sigma_y^2} \right\}\right\}, \quad (4)$$

式中 θ 为目标运动方向与水平方向沿逆时针方向的角度。

从本文星图目标质心提取模型(4)式可以看出,该模型对 x 方向和 y 方向分别使用了不同的扩散参数,可以描述目标的线性特征;同时,引入了旋转角度 θ ,用以刻画运动目标的随机运动方向。此外,可以看出,当 $\sigma_x = \sigma_y$ 且 $\theta = 0^\circ$ 时,本文模型退化为传统模型,可用于恒星目标的质心提取。因此传统高斯曲面拟合模型

是(4)式的一个特例,本文模型是各向异性的,对任意星图目标(恒星或卫星)均适用。

为获得目标的质心 (x_0, y_0) ,需要利用观测星图反演(4)式中的各个参数。然后探讨模型的求解方法,对(4)式两边同时取对数可得

$$\ln(f) = \ln(A) - \frac{1}{2} \left\{ \frac{[(x - x_0)\cos\theta + (y - y_0)\sin\theta]^2}{\sigma_x^2} + \frac{[(x - x_0)\sin\theta - (y - y_0)\cos\theta]^2}{\sigma_y^2} \right\}, \quad (5)$$

可以看出,(5)式为 x 和 y 的二次函数,因此可将(5)式表示为

$$\ln(f) = t_0 + t_1x + t_2y + t_3xy + t_4x^2 + t_5y^2, \quad (6)$$

式中 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ 这 6 个参数可分别由(5)式展开获得,

$$\begin{cases} t_0 = -\frac{1}{2} \left(\frac{x_0^2 \cos^2\theta + y_0^2 \sin^2\theta + 2\cos\theta \sin\theta x_0 y_0}{\sigma_x^2} + \frac{x_0^2 \sin^2\theta + y_0^2 \cos^2\theta - 2\cos\theta \sin\theta x_0 y_0}{\sigma_y^2} \right) + \ln(A) \\ t_1 = \frac{\cos\theta \sin\theta y_0 + \cos^2\theta x_0}{\sigma_x^2} + \frac{-\cos\theta \sin\theta y_0 + \sin^2\theta x_0}{\sigma_y^2} \\ t_2 = \frac{\cos\theta \sin\theta x_0 + \sin^2\theta y_0}{\sigma_x^2} + \frac{-\cos\theta \sin\theta x_0 + \cos^2\theta y_0}{\sigma_y^2} \\ t_3 = -\frac{\cos\theta \sin\theta}{\sigma_x^2} + \frac{\cos\theta \sin\theta}{\sigma_y^2} \\ t_4 = -\frac{\cos^2\theta}{2\sigma_x^2} - \frac{\sin^2\theta}{2\sigma_y^2} \\ t_5 = -\frac{\sin^2\theta}{2\sigma_x^2} - \frac{\cos^2\theta}{2\sigma_y^2} \end{cases} \quad (7)$$

由(7)式易知,在 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ 已知时,模型中的 6 个参数可分别计算为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{t_2 t_3 - 2t_1 t_5}{4t_4 t_5 - t_3^2} \\ y_0 = \frac{t_1 t_3 - 2t_2 t_4}{4t_4 t_5 - t_3^2} \\ \sigma_x^2 = \frac{t_4 + t_5 + \sqrt{(t_4 - t_5)^2 + t_3}}{t_3 - 4t_4 t_5} \\ \sigma_y^2 = \frac{t_4 + t_5 - \sqrt{(t_4 - t_5)^2 + t_3}}{t_3 - 4t_4 t_5} \\ \cos\theta = \frac{1}{2}(t_5 - t_4) \sqrt{(t_4 - t_5)^2 + t_3} + (t_4 - t_5)^2 + t_3 \\ A = \exp \left[t_0 - \frac{t_1 t_2 t_3^3 + t_1^2 t_4 t_5^2 + t_2^2 t_4^2 t_5 - 3t_1 t_2 t_3 t_4 t_5}{(t_4 t_5 - t_3^2)^2} \right] \end{cases} \quad (8)$$

因此求解 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ 是质心提取的关键。由于有 6 个未知数,因此至少需要 6 个像素参与计算,实际图像中目标及其弥散的像素数目多于 6 个,使得(6)式为超定方程,本文使用最小二乘法求取 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ 。假定 n 个目标像素坐标分别为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$, 图像亮度分别为 f_i , 则构造如下 $n \times 6$ 的矩阵

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n y_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

令 $\mathbf{t} = [t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5]^T$, 则(6)式可以表示为

$$\mathbf{B}t = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_0 \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln f_1 \\ \ln f_2 \\ \vdots \\ \ln f_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

令 $\mathbf{f} = [\ln f_1 \ \ln f_2 \ \cdots \ \ln f_n]^T$, 则由(10)式可得,

$$\mathbf{t} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{f} \quad (11)$$

这样利用(11)式即可计算中间参数 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$, 从而最终计算目标质心。

综上所述, 利用各向异性高斯曲面拟合法计算星图目标质心步骤如下:

- 1) 利用(9)式构造参数矩阵 \mathbf{B} ;
- 2) 对像元取对数, 构造向量 \mathbf{f} ;
- 3) 按(11)式计算中间参数 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$;
- 4) 按(8)式计算模型参数, 其中 (x_0, y_0) 为目标质心坐标。

值得注意的是, 本文方法需要计算 6 个参数, 因此至少需要目标占据 6 个像素, 绝大多数情况下, 都能够满足要求。当目标弥散像素不足 6 时, 可以使用双线性插值法^[17] 对目标像素插值, 然后再使用本文方法计算质心。

3 实验结果

3.1 仿真实验

仿真实验参数如下: 星图大小为 512 pixel × 512 pixel, 星点总目标为 100 个, 运动空间目标随机分配 10 个, 其余为背景恒星, 目标位置随机分配, 每个星点的模糊参数随机生成, 因此各个目标大小不同, 卫星目标的运动方向在 $[0, 2\pi]$ 间随机分配, 运动速度采用随机参数模拟, 因此各卫星目标表现出一定的独立性。仿真得到的图像如图 5 所示。



图 5 仿真星图

Fig. 5 Simulated map

本文分别使用 WGC 法、传统 GSF 质心提取法以及各向异性高斯曲面拟合法 (AGSF) 质心提取法来计算目标的质心。为了比较各质心提取方法的性能, 令 (x'_i, y'_i) 为各个方法获得的第 i 个目标的质心, (x_i^0, y_i^0) 为第 i 个目标的真实质心, 实验采用如下指标度量各个方法获得的质心与实际质心的偏离误差

$$d = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [(x'_i - x_i^0)^2 + (y'_i - y_i^0)^2]} \quad (12)$$

式中 m 为目标个数。为了比较各个质心提取方法在不同目标 (恒星或运动卫星) 上的差异, 实验对所有目标、运动卫星和恒星目标分别计算上述指标, 三个方法对应的误差如图 6 所示, 从左向右依次为各方法的所有目标均方误差、卫星目标均方误差以及恒星目标均方误差。

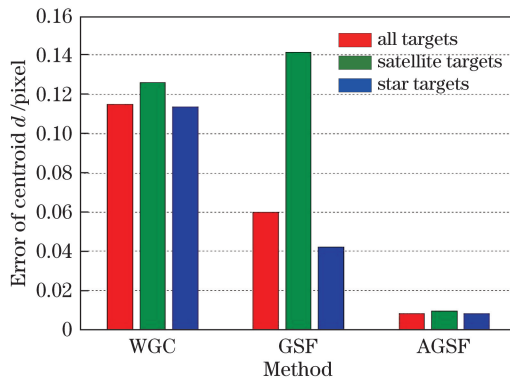


图 6 质心误差

Fig. 6 Error of centroid

从图 6 中可以看出,整体而言,三种方法的精度由高到低依次为 AGSF、GSF、WGC,各方法质心提取的总体均方误差分别为 0.0085、0.0600、0.1149,三种方法能够达到的目标定位精度分别约为 1/120、1/20、1/10 pixel。由此可知,WGC 法使用线性加权的方式确定目标质心,相当于对目标的扩散效应使用一阶函数近似,忽略了高阶特征,从而具有较低的精度;而 GSF 相当于使用高斯函数近似,充分利用了扩散函数的高阶特征,因此获得了更好的精度,但 GSF 各个方向均一,仅适用于近圆形的斑点目标(比如恒星),但对于非近圆形的目标则效果较差;AGSF 模型利用了高斯函数的高阶特性,并且对非圆形目标以及目标的方向都有充分考虑,具有各向异性的特点,同时适用于星图中的恒星和卫星目标。三种方法的分析对比如表 1 所示。

表 1 三种质心提取方法的分析对比

Table 1 Analysis of three centroid extraction methods

Method	Characteristic	Applicability
WGC	First-order	Universal
GSF	First-order、second-order	Circular target
AGSF	First-order、second-order	Universal

从图 6 中运动目标和恒星目标的对比可以看出,对恒星目标而言,AGSF 和 GSF 的精度较高,定位精度分别约为 1/120 pixel 和 1/25 pixel,这两个方法利用了高阶特性,同时恒星为近圆形目标,适合使用高斯拟合方法确定质心,因而精度较高;而 WGC 由于仅利用一阶信息,因此精度较低。对运动卫星目标进行观察,可以发现一个有趣的现象,GSF 的精度比 WGC 的精度低,定位误差分别为 0.1413 和 0.1262。从表 1 中的分析不难发现,这是因为虽然 GSF 利用了高阶特征,但其并不适用于非圆形目标(卫星为线状特征),相当于模型出现了偏差,因此定位精度较低。本文提出的 AGSF 由于充分考虑了目标的线性和运动角度特征,因而对卫星目标定位精度最高(定位误差为 0.0096)。

为了研究噪声对质心提取的影响,对模拟图像添加了一系列强度的随机高斯噪声,噪声强度以信噪比(SNR)来衡量,强度分别为 10 dB、15 dB、20 dB、25 dB、30 dB、35 dB、40 dB 以及 ∞ (无噪声)。三种质心提取方法在不同的噪声图像中质心提取的结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,就总体误差而言,在所有信噪比下,三种方法的精度由高到低依次为 AGSF、GSF、WGC,尤其是当信噪比较低时(比如 SNR, $S_{NR}=10$ dB),AGSF 的优势更为明显。随着 SNR 的提高,三种方法的质心提取误差都在降低。从曲线趋势可以看出,WGC 曲线最为陡峭,说明噪声对 WGC 方法影响最大,与文献[10]中的 WGC 方法对噪声敏感的结论一致。

3.2 真实星图实验

以中国科学院 600 mm 口径的大视场(4.8°)光学望远镜作为实验拍摄仪器,软件平台为 matlab2010,硬件配置为 Intel 双核 2.4 G CPU,1 G 内存。天文定位计算机选用 P4 3.0 CPU 的便携式工控机。实验中采用恒星模式的拍摄方式对星空进行成像,选择晴朗夜晚拍摄的星图,该 CCD 图像大小为 512 pixel \times 512 pixel,共 60 帧,其中两帧图像经去噪预处理后分别如图 8(a)、(b)所示。

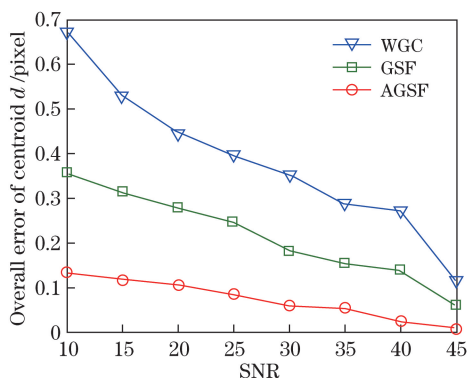


图 7 不同质心提取方法获得的质心误差随着不同信噪比的变化

Fig. 7 Centroid errors of different methods as the change of different SNR values

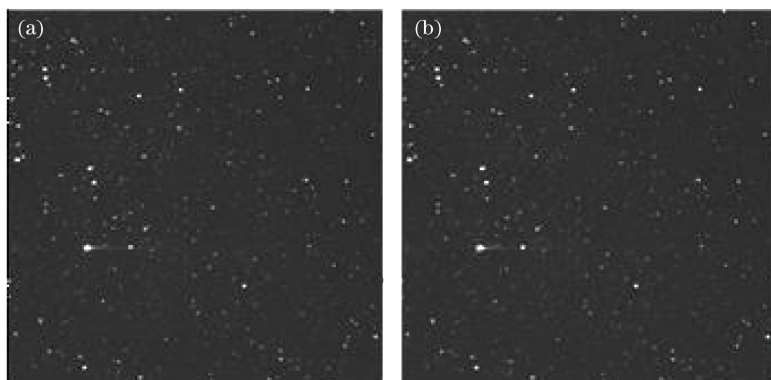


图 8 原始星图。(a)第一帧;(b)第二帧

Fig. 8 Original map. (a) First frame; (b) second frame

由于图像中各目标的真实位置是未知的,所以不能使用仿真实验中的质心误差方法比较各方法的性能。每种方法的质心提取结果都有一定误差,且在不同帧图像中误差是随机的,因此对同一目标而言,误差大的方法在 60 帧图像中提取的结果必定更为分散,表现为 60 个质心提取结果具有更大的方差。因此采用同种方法以 60 帧图像中提取的 60 个结果的方差作为衡量方法性能的指标,方差越小则精度越高。

需要说明的是,以上方法仅能比较位置不变的恒星目标定位精度,对于卫星目标则使用如下方法:卫星运动轨迹可以近似看作直线,利用三种方法提取的质心进行直线拟合得到卫星的运动轨迹,以此估计每帧图像中卫星的位置作为真实位置,然后计算各方法提取的质心与真实位置的距离,使用该定位误差作为卫星目标的定位衡量指标。

该星图中共有目标 317 个,其中位置不变的恒星目标 315 个,运动卫星目标 2 个。每种方法对每个恒星目标都有 60 次质心提取结果,每种方法对某恒星目标质心提取的 60 次结果如图 9(a)所示,某卫星轨迹拟合以及各方法提取卫星质心如图 9(b)所示,卫星定位误差如图 9(c)所示。

从图 9(a)可以看出,各个质心提取方法得到的恒星位置均存在一定的误差,其中 WGC 方法的误差最大,本文 AGSF 方法的误差最小,说明本文方法可以改善恒星目标的定位精度。从图 9(b)可以看出,卫星的轨迹近似直线,受坐标轴范围的影响,仅从运动轨迹图中,难以分辨各方法的优劣。从图 9(c)中的定位误差可以看出,WGC 和 GSF 对卫星定位具有较大误差,本文 AGSF 误差较低。对 315 个恒星目标定位方差以及 2 个卫星目标定位误差分别取平均值,如图 10 所示,从左向右依次为各方法的所有目标平均误差、卫星目标平均误差以及恒星目标平均误差。

从图 10 可以看出,WGC、GSF 以及 AGSF 对恒星的定位误差分别为 0.2647、0.1153、0.0401;对于运动卫星目标,则三种方法的定位误差分别为 0.2970、0.3178、0.0425。可以看出这三种方法对卫星的定位精度

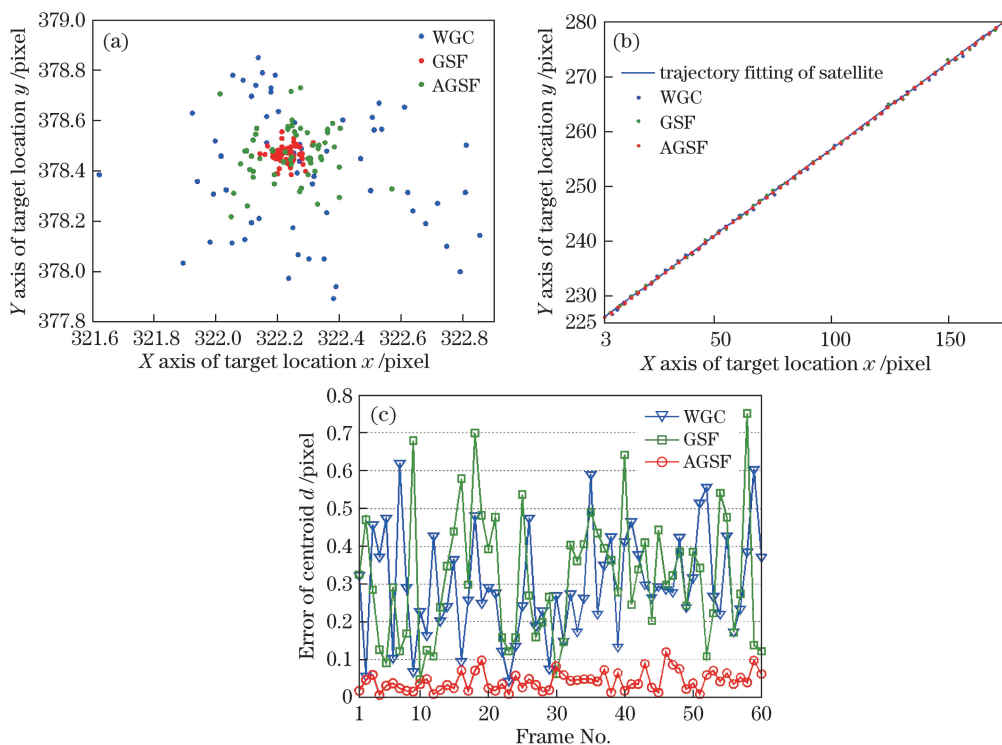


图 9 (a)恒星质心提取结果;(b)卫星轨迹拟合及质心提取结果;(c)卫星质心提取误差

Fig. 9 (a) Centroid extraction result of star; (b) trajectory fitting and centroid extraction result of satellite; (c) centroid extraction error of satellite

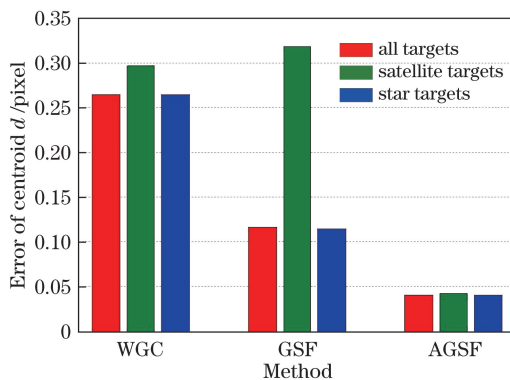


图 10 真实数据实验

Fig. 10 Real data test

均有降低,这可能是卫星的运动效应导致的。但 GSF 对卫星定位精度显著降低,如前文分析,这是由于 GSF 的模型并不适用于运动卫星目标而导致的系统误差。

4 结 论

提出了基于各向异性的高斯曲面拟合的星图目标质心提取算法 AGSF,该方法构建了适用于运动目标的各向异性高斯曲面拟合模型,克服了传统高斯曲面拟合模型仅适用圆形目标的缺点。仿真实验和真实数据实验表明,AGSF 可以准确地提取星图中恒星目标和卫星目标的质心,对仿真数据和真实图像的总定位精度分别达到 0.008 和 0.04。相比传统方法有较大提高,尤其是对卫星的定位精度大大提高。此外,所提出的对真实图像的定位精度分析比较方法可以为其他研究提供有价值的参考。

参 考 文 献

- [1] Sun Rongyu, Zhao Changyin. Optical survey technique for space debris in GEO[J]. Progress in Astronomy, 2012, 30(3): 394-410.
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(3): 394-410.
- [2] Zong Hua, Wang Bo, Zhou Zhiqiang, *et al.* An autonomous star identification algorithm based on patterns matching[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(10): 1032-1037.
踪 华, 汪 渤, 周志强, 等. 一种基于模式匹配的自主星图识别算法[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(10): 1032-1037.
- [3] Zheng S, Wu W R, Tian J, *et al.* A novel all-sky autonomous triangle-based star map recognition algorithm[J]. Optoelectronic Engineering, 2004, 31(3): 4-7.
- [4] Chaudhuri S, Rajagopalan A N. Depth from defocus: a real aperture imaging approach[M]. Berlin: Springer, 1999: 17-18.
- [5] Lian Yueyong, Zhang Chao, Xie Zongte. Accuracy analysis for sub-pixel location of star image[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(6): 578-582.
连月勇, 张 超, 谢宗特. 星点亚像元细分定位精度分析[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(6): 578-582.
- [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] Yuan Yulei, Zheng Yong, Du Lan. High-accuracy centroid algorithm of star points[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2012, 29(2): 122-126.
原玉磊, 郑 勇, 杜 兰. 星点中心高精度质心定位算法[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(2): 122-126.
- [8] 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.
- [9] Hu Xiaodong, Hu Qiang, Lei Xing, *et al.* Method of star centroid extraction used in daytime star sensors[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(4): 481-485.
胡晓东, 胡 强, 雷 兴, 等. 一种用于白天星传感器的星点质心提取方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4): 481-485.
- [10] Li Peng, Gao Limin, Wu Yiming, *et al.* Research on subpixel location error of weighted centroiding algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(6): 43-46, 72.
李 朋, 高立民, 吴易明, 等. 加权质心法亚像元定位误差研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(6): 43-46, 72.
- [11] Feng Xinxing, Zhang Liyan, Ye Nan, *et al.* Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512002.
冯新星, 张丽艳, 叶 南, 等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512002.
- [12] Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1672-1677.
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- [13] Jia Ruiming, Ma Xiaolei, Hao Yuncai. Research on star subdivision location method based on skewed normal distribution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051002.
贾瑞明, 马晓蕾, 郝云彩. 基于偏正态分布的星点细分定位方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051002.
- [14] Zhang Yan, Cui Zhishe, Long Teng. Tracing the centroid of a maneuvering target in image sequences[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2001, 22(4): 312-316.
张 岩, 崔智社, 龙 腾. 图像序列中机动目标的形心跟踪[J]. 航空学报, 2001, 22(4): 312-316.
- [15] Wang Guangjun, Fang Jancheng. High precision interpolation algorithm for star pattern[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(5): 566-569.
王广君, 房建成. 一种星图识别的星体图像高精度内插算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(5): 566-569.
- [16] Shortis M R, Clarke T A, Short T. Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images[C]. SPIE, 1994, 2350: 239-250.
- [17] Li Yufeng, Hao Zhihang. Research of hyper accuracy subpixel subdivision location algorithm for star image[J]. Optical Technique, 2005, 31(5): 666-671.
李玉峰, 郝志航. 星点图像超精度亚像元细分定位算法的研究[J]. 光学技术, 2005, 31(5): 666-671.