

基于可分离模糊核的复合运动模糊星图建模与仿真

袁洪琳, 李帆, 于涛, 张存读, 赵建辉

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 在采用天文光学自主导航方式进行深空探测时, 导航星的视星等高, 为获取清晰的星图, 星敏感器焦距长、曝光时间长, 同时受探测器多种运动复合的影响, 星图易产生模糊拖尾现象, 很难用基于硬件的常规方法有效复原。研究复合运动模糊星图的建模方法, 可揭示星敏感器与导航星的真实相对运动对星图像质的影响规律, 从而用软件算法复原高像质星图, 提高星敏感器的动态性能。由于缺乏确定的参数模型, 复合运动模糊星图建模难度较大。提出了一种基于可分离模糊核的复合运动模糊星图建模的新方法, 研究星敏感器角运动和角振动对成像的影响, 并与常用的分步模糊方法比较。仿真表明: 基于可分离模糊核方法的仿真星图更符合星敏感器实际运动对星图退化的影响; 星敏感器的复合运动特别是旋转运动对质心提取效果具有显著影响, 严重时会导致星敏感器无法定姿。

关键词: 星敏感器; 复合运动; 可分离模糊核; 建模; 仿真

中图分类号: TP391.4; TN379 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1126001

Modeling and simulation of blurred star images by the complicated motion based on the separable kernel

Yuan Honglin, Li Fan, Yu Tao, Zhang Cundu, Zhao Jianhui

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In the deep space exploration, astronomical optical autonomous navigation was used. The apparent magnitude of navigation stars for optical autonomous navigation was high. In order to obtain the clear star image, the star tracker's focal length and exposure time were long. Besides, star trackers were easily influenced by complicated motion. All these reasons resulted to the blurring and smearing star images. What was worse, it was difficult to restore the blurred star images by hardware methods. Studying the modeling method based on complicated motion was helpful to make sense the influence on the image quality which was caused by relative motion between the star tracker and the navigation star and to restore blurred star images by software methods. So that the star tracker's dynamic performance was improved. It was hard to simulate blurred star images which were caused by the complicated motion of star trackers for the lack of definite motion models. The angular motion and vibration were analyzed and an innovative method was proposed to simulate the blurred star images and then the step-by-step simulation method was compared with the new method in this paper. The simulation results indicated that

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB744200); 国家自然科学基金(61233005)

作者简介: 袁洪琳(1990-), 女, 硕士生, 主要从事航天器制导与控制、智能算法等方面的研究。Email: yuanhonglin@buaa.edu.cn

通讯作者: 李帆(1972-), 女, 副教授, 主要从事航天器制导与控制、智能算法方面的研究。Email: lifan@buaa.edu.cn

the simulation method based on the separable kernel could describe the real physical image process better than the step-by-step method and the complicated motion had great influence on the extraction errors of star spot centroids, even leading to the failure of attitude determination of star trackers.

Key words: star trackers; complicated motion; separable blur kernel; model; simulation

0 引言

随着人类深空探测步伐的加快,对高像质图像感知的需求更加强烈。采用天文光学自主导航方式时,因被摄导航星视星等较高,故星敏感器的视场角小,焦距长,曝光时间长^[1],使得星敏感器的轻微运动都可能造成星图模糊不清。当探测器机动飞行或发生振动时,星图降质更为显著,传统的机械式、光学式^[2-3]等基于硬件的补偿方法此时难以对运动模糊星图进行有效的复原,严重影响姿态确定时对星图质心的提取精度,甚至无法正常定姿。由此可见,研究运动模糊星图的仿真方法,为揭示星敏感器与被摄星体的相对运动对星图像质的影响规律,提高星敏感器动态性能,实现星图有效复原具有重要的理论意义与工程应用价值。

目前人们对运动模糊的仿真已经展开较为广泛的研究。参考文献[4]建立了角运动及振动状态下星图模糊的数学模型,并对星图进行分步模糊仿真和分步复原,但空间变化与空间不变的复合运动模糊在一定程度上并不满足多重卷积叠加关系。参考文献[5-6]给出了仅存在绕光轴或绕非光轴角转动时星点的数学模型。参考文献[7]对星敏感器振动形式进行了归类并对振动模糊图像进行了仿真分析和检测,但没有涉及旋转等角运动形式。参考文献[8]推导了模糊核的数学模型,对空间不变的模糊星图复原进行了仿真研究,没有涉及空间变化的模糊星图的仿真。参考文献[4,8~10]都是先建立仅绕光轴转动或仅绕非光轴转动模糊核的数学模型,由此进行运动模糊星图的仿真。综上,目前对模糊星图的研究局限于绕光轴或非光轴的角运动或角振动的模糊星图建模和复原,对于同时存在角运动和角振动的复合运动的模糊星图研究较少,由于尚没有确定的参数模型,因此复合运动的星图模糊建模与仿真具有较大难度。

针对这一问题,文中提出一种基于可分离模糊核的模糊星图仿真新方法。根据运动模糊成像原理,首先分析了星敏感器不同运动形式对星图模糊产生的影响;然后研究了基于可分离模糊核的复合运动模糊星图仿真方法,并与真实模糊星图及常用的分步模糊的方法进行了对比,验证了文中仿真原理的正确性;最后分析了复合运动模糊对星图质心提取的影响。

1 运动模糊成像机理

1.1 原始星图

为了对深空探测过程中星图进行仿真,需要根据行星的赤经赤纬和光轴指向,确定特定视场范围内导航星映射在星敏感器面阵的位置。由于星敏感器安装在航天器上,所以只需考虑导航星所在的天球坐标系到星敏感器坐标系之间的转换关系。因为导航星到地球距离远大于地球到航天器距离,所以认为天球坐标系与星敏感器坐标系原点重合,只考虑旋转变换关系。参考文献[11],根据星敏感器视场与像素宽高以及焦距的关系如公式(1)所示和像素个数与视场大小推导得到视场内任意导航星在星敏感器面阵上的坐标,如公式(2)所示。

$$\tan\left(\frac{\text{FOV}_x}{2}\right) = \frac{N_x \times d_h}{2f} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = \frac{N_x}{2} \times \frac{1}{\tan(\text{FOV}_x/2)} \times \frac{\cos\delta_s \sin(\alpha_s - \alpha_0)}{\sin\delta_s \sin\delta_0 + \cos\delta_s \cos\delta_0 \cos(\alpha_s - \alpha_0)} \\ y = \frac{N_y}{2} \times \frac{1}{\tan(\text{FOV}_y/2)} \times \frac{\sin\delta_s \cos\delta_0 - \cos\delta_s \sin\delta_0 \cos(\alpha_s - \alpha_0)}{\sin\delta_s \sin\delta_0 + \cos\delta_s \cos\delta_0 \cos(\alpha_s - \alpha_0)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为 CCD 每行像素个数; d_h 为像素宽度; f 为焦距; FOV 为水平方向视场大小; (α_0, β_0) 为光轴指向; (α_s, β_s) 为导航星坐标。确定坐标后,需要选定任意视场内的导航星,假设 CCD 镜头视场投影到单位天球上的区域 S 固定为 $W \times H$, 通过讨论 S 在天球上所覆盖截面圆弧长的情況^[12],可以确定不同视场下

的赤经跨度范围。

假设光轴方向为 (α_0, δ_0) 。恒星的赤经赤纬为 (α, δ) ,根据设定的条件可确定观测星。文中采用一个高斯随机噪声表示 CCD 在生成星图时的背景噪声,得到图 1 所示初始星图,其中光轴指向为 $(10.254 12^\circ, 10.254 12^\circ)$,高斯半径 $\sigma=0.7$ 。



图 1 初始星图

Fig.1 Original star map

1.2 旋转引起的星图模糊

通常认为星体与航天器的距离是无穷远,可以忽略星体与飞行器相对位移对成像的影响,此处仅考虑星敏感器旋转运动的影响。

根据上文所建立的坐标系,星敏感器的绕坐标轴 X_c, Y_c, Z_c 的旋转运动可以等效为星体分别绕相应的坐标轴向相反方向转动相同的角度,旋转角分别为 $\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta\psi$,如 2 图所示。

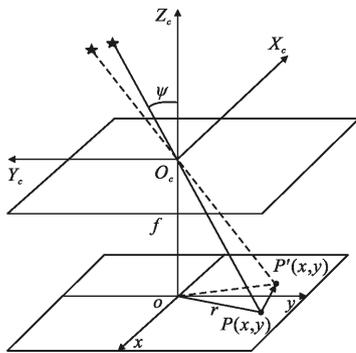


图 2 星敏感器的旋转运动

Fig.2 Rotation of the star tracker

其中 $P(x,y)$ 为星点初始位置, $P'(x,y)$ 为旋转后的星点位置, f 为焦距, ψ 为导航星与星敏感器的夹角。

1.2.1 星敏感器绕非光轴转动

考虑星敏感器绕 X_c 轴转动 $\Delta\theta$ 角度,如图 3 所示。

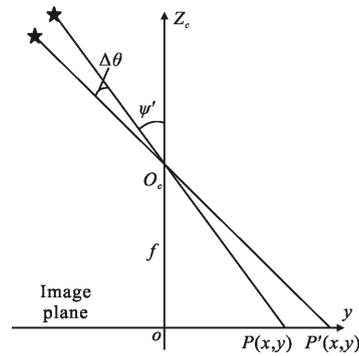


图 3 星敏感器绕 X_c 轴转动 $\Delta\theta$ 角度

Fig.3 Star tracker rotating $\Delta\theta$ around X_c axis

则像点在像面上沿 Y_c 方向平移:

$$L_y' = f \cdot [\tan(\psi' + \Delta\theta) - \tan\psi'] \quad (3)$$

式中: f 为焦距; ψ' 为静止时星与光轴的夹角。

整理可得:

$$L_y' = f \cdot (1 + x^2/f^2) \Delta\theta \quad (4)$$

类似地,可得绕 Y_c 轴转动 $\Delta\varphi$ 角度后,像点在像面上沿 X_c 方向的平移:

$$L_x' = f \cdot (1 + y^2/f^2) \Delta\varphi \quad (5)$$

由公式(4)、(5)可知,星敏感器绕非光轴转动,当焦距 f 的值较大时,星敏感器的运动可以近似看作空间不变的运动,对于绕非光轴任意方向的运动可以将其位移分解到 x 轴和 y 轴方向进行模糊星图仿真。

1.2.2 星敏感器绕光轴转动

考虑星敏感器绕 Z_c 轴转动 $\Delta\psi$ 角度,如图 4 所示。

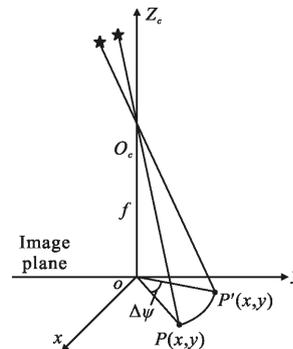


图 4 星敏感器绕 Z_c 轴转动 $\Delta\psi$ 角度

Fig.4 Star tracker rotating $\Delta\psi$ around Z_c axis

则像点在像面上的位移为:

$$\begin{cases} Lx'' = \sqrt{x^2 + y^2} \sin\Delta\psi \\ y = \sqrt{x^2 + y^2} \cos\Delta\psi \end{cases} \quad (6)$$

由上式可知当星敏感器绕光轴旋转时,像点的运

动轨迹与星点初始位置有关,因此每个像点的模糊核不再相同,所得到的模糊星图不再具有全局一致的模糊核,传统的全局一致的模糊方法不再适用此种情况。所以需要根据星敏感器的运动特性,用运动过程中每个像素点的运动轨迹对该像素点进行模糊仿真。

1.3 振动引起的星图模糊

振动分为线性振动、简谐振动、复合振动和随机振动,由于这几种运动形式均可表示为简谐振动叠加的形式,因此以简谐振动为例进行分析,简谐振动又分为高频振动和低频振动。低频振动的振动周期 T 接近或大于星敏感器曝光时间 t ,此时星图的模糊形式依赖于初始时间,初始相位和曝光时间等因素,成像过程具有随机性,如图 5 所示。

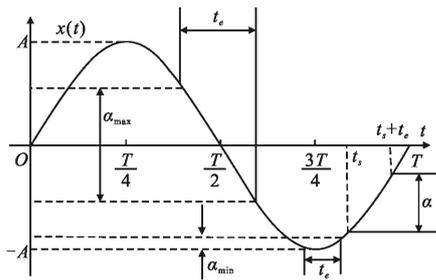


图 5 低频振动的像移与曝光起始时间的关系
Fig.5 Blur radius a as function of exposure time for low frequency vibrations

高频振动的振动周期 T 远小于星敏感器曝光时间 t ,积分过程中不满一个周期的部分的影响可以忽略不计,可以令 $\varphi=0$,即

$$s(t)=A\cos(2\pi ft) \quad (7)$$

设振动方向与 X 轴所成的角度为 α ,将其分解为水平方向与垂直方向的振动进行模糊星图仿真,复杂振动可认为是几种不同的简谐运动相叠加而形成,文中主要研究绕非光轴的角振动。

2 复合运动模糊星图建模与仿真

2.1 常用单一模糊核方法的局限性

星图运动模糊是由曝光时间内星敏感器与星体的相对运动造成的,假设 $f(x,y)$ 为原始星图,经过一个退化过程 H ,噪声为加性噪声 $n(x,y)$,形成退化图像为 $g(x,y)$,则图像的退化过程可以表示为:

$$g(x,y)=H[f(x,y)]+n(x,y) \quad (8)$$

退化过程可以用原始图像与相应的模糊核相卷

积来表示。传统的分析算法中认为图像的模糊是全局一致的,即可以用一个模糊核与整幅图像进行卷积来模拟图像的退化过程,但是星敏感器相对星体的实际运动要复杂得多,既有线运动,也有旋转运动及角振动,尤其是深空探测过程中,星敏感器的视场角较小,焦距长,星敏感器的曝光时间长,由星敏感器运动得到的模糊星图更加复杂多样,导致单一的模糊核难以描述实际的运动模糊情况。

2.2 基于可分离模糊核的建模与仿真新方法

文中提出一种基于可分离模糊核的新方法对实际的模糊星图进行建模与仿真。

一个模糊核可以由轨迹、运动速度和星敏感器成像因素三个要素决定^[14],如图 6 所示。

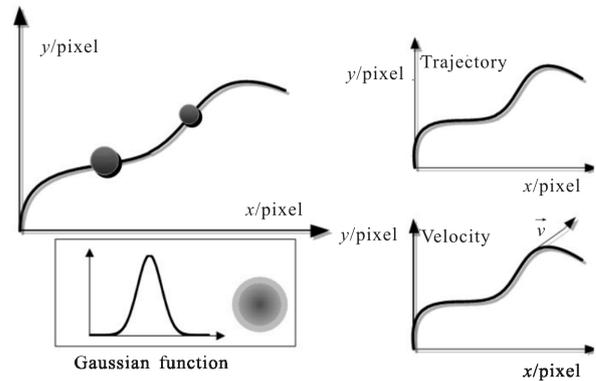


图 6 可分离模糊核
Fig.6 Separable blur kernel

图 6 曲线即为模糊核运动轨迹,它决定模糊核的整体形状;圆点的明暗度反映轨迹上对应点的速度大小,它与运动速度的大小成反比;圆点的大小表示各种成像因素(焦距、景深、星敏感器运动)的影响程度,可分离模糊核可由公式(9)表示:

$$K = \int \frac{T(x(t),y(t))}{V(t)} \otimes G(x(t),y(t))dt \quad (9)$$

式中: $T(x(t),y(t))$ 为星敏感器的运动轨迹; $V(t)$ 为经过轨迹上对应点的速度; $G(x(t),y(t))$ 为 2D 的高斯函数。以星图中的某个点 P 为例,设其初始位置为 (x_0,y_0) ,在 $0-t$ 时间内根据星敏感器不同的运动形式,可得到 P 点的运动轨迹 $T(x,y)$ 。由于模糊核对应像素的灰度值与运动速度成反比,根据 P 点在轨迹上每个点速度的不同,可得到加权后的轨迹。焦距、景深、星敏感器运动形式对成像的影响可用二维高斯分布进行模拟。

首先确定轨迹 $T(x,y)$,由第一节分析可知,若

已知星敏感器绕非光轴旋转角度 $\Delta\theta$ 及其曝光时间 T , 通过坐标转换便可求得其在相平面上的运动轨迹, 即模糊核的轨迹。其表达式为:

$$l(t)=at/T \quad (10)$$

当 $t=T$ 时, 星图的总位移为 a , a 已在第一节推导得出。若星敏感器的运动方向与 x 轴夹角为 α , 则模糊核沿 x 轴和 y 轴的运动轨迹分别为:

$$l_x(t)=at/T*\cos\alpha \quad (11)$$

$$l_y(t)=at/T*\sin\alpha \quad (12)$$

当星敏感器绕光轴转动时, 若已知其绕光轴的旋转角速度 w , 则模糊核沿 x 轴和 y 轴的运动轨迹分别为:

$$r_x(t)=r*\cos(wt) \quad (13)$$

$$r_y(t)=r*\sin(wt) \quad (14)$$

式中: r 为像素点到相平面中心的距离。

当星敏感器出现高频振动时, 若已知其振动的幅值和频率分别为 A, f 则模糊的运动轨迹为:

$$S(t)=A\cos(2\pi ft) \quad (15)$$

若其与 x 轴的夹角为 β , 则模糊核沿 x 轴和 y 轴的运动轨迹分别为:

$$S_x(t)=A*\cos(wt)*\cos\beta \quad (16)$$

$$S_y(t)=A*\cos(wt)*\sin\beta \quad (17)$$

当星敏感器存在复合运动时, 模糊核在像平面 x 轴和 y 轴方向的轨迹分别为:

$$x(t)=l_x(t)+r_x(t)+S_x(t) \quad (18)$$

$$y(t)=l_y(t)+r_y(t)+S_y(t) \quad (19)$$

模糊核轨迹确定后, 若已知运动速度, 便可得到轨迹上每个像素点的权重, 它与在像素点的停留时间成正比。将曝光时间 T, M 等分, $\Delta t=T/M$, 使 $\Delta t=1 \text{ ms}$ 。对运动轨迹进行等间隔取样, 求出轨迹在每个像素点的取样次数, 可近似得到每个像素点的权重, 如图 7 所示。

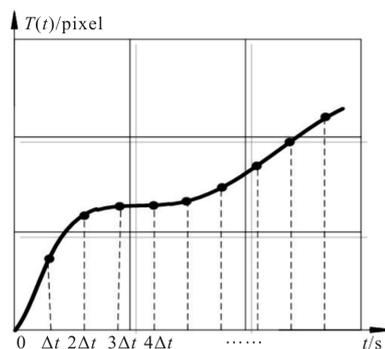


图 7 运动轨迹权重

Fig.7 Proportion of motion trajectory

图 7 中, 一个方格代表一个像素点, 曲线为轨迹, 圆点为取样点。

将确定了权重的运动轨迹与 2D 高斯函数卷积, 便可得到可分离模糊核。可分离模糊核的形成过程如图 8 所示。

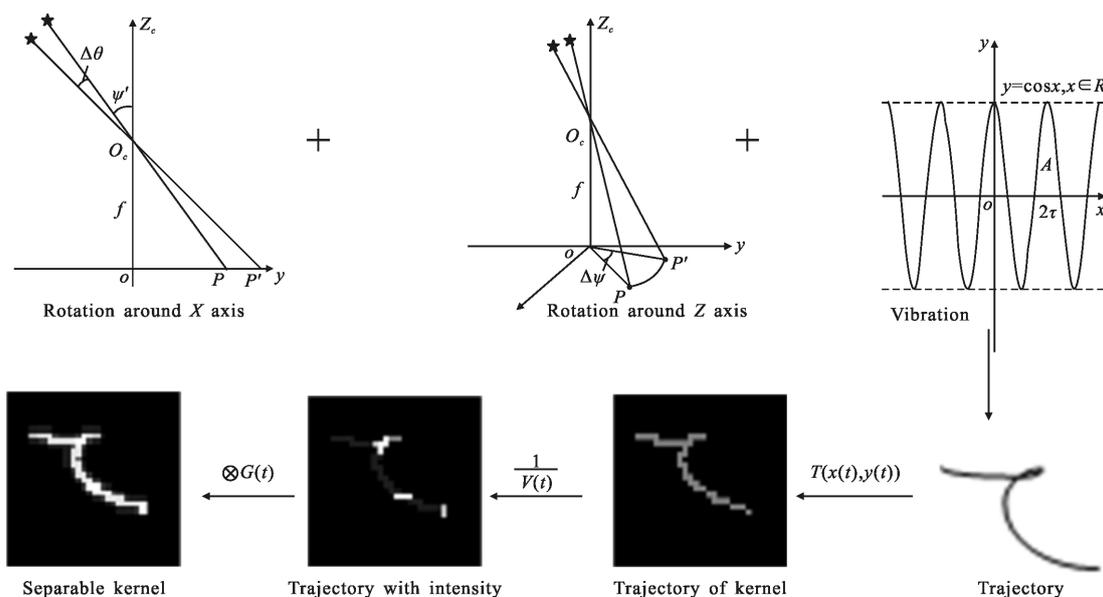


图 8 可分离模糊核形成过程

Fig.8 Formation process of the separable blur kernel

文中基于可分离模糊核的形成过程,既可仿真具有全局一致模糊核的模糊星图,又可仿真具有全局变化模糊核的模糊星图。

设由复合运动形成的模糊星图为 $g(x,y)$,将其视为运动过程中物体各个瞬态位置成像的线性叠加,星图 $f(x,y)$ 进行平面运动, $x_0(t), y_0(t)$ 分别是在 x 轴和 y 轴方向上随时间变化的分量,即可分离模糊核的运动轨迹, T 为曝光时间,则有:

$$g(x,y) = \int_0^T f[x-x_0(t), y-y_0(t)] dt \quad (20)$$

将曝光时间细分得到运动星图表达式:

$$g(x,y) = \int_0^T f[x-x_0(t), y-y_0(t)] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} f[x-x_0(t_i), y-y_0(t_i)] \quad (21)$$

式中: $t_{M-1}=T, f[x-x_0(t_i), y-y_0(t_i)]$ 为根据移动原始清晰星图 $f(x,y)$ 得到的清晰星图。 M 越大,仿真星图越接近真实模糊星图。

根据所测绕非光轴转动、绕光轴转动及振动的运动参数,能确定可分离模糊核的运动方程,进而仿真得到复合运动模糊星图。

3 仿真实验

3.1 仿真条件设定

为满足深空探测导航精度的要求,所选取的星敏感器性能参数如公式(1)所示,公式(2)、(3)为星敏感器的运动过程参数。

(1) 采用视场范围为 $1^\circ \times 1^\circ$, CCD 面阵为 512×512 , 每个像元尺寸为 $d_h=d_v=15 \mu\text{m}$, 透镜焦距为 1100 mm , 星等灵敏度为 5 Mv , 星敏感器光轴指向为 $(10.25412^\circ, 10.25412^\circ)$, 曝光时间为 $T=500 \text{ ms}$;

(2) 沿非光轴运动的距离为 10 个像素, 与水平方向所成的角度为 30° ;

(3) 绕光轴旋转时, 旋转的角速度为 $w_z=10^\circ/\text{s}$, 旋转 5° ;

(4) 振动的幅值为 $A_1=10 \text{ pixel}, A_2=11 \text{ pixel}$, 频率为 $f_1=50 \text{ Hz}, f_2=60 \text{ Hz}$, 与水平方向所成的角度 $\alpha_1=30^\circ, \alpha_2=45^\circ$ 。

另外,噪声选用均值为 0, 方差为 0.02 的高斯白噪声。

3.2 模糊星图仿真

根据 3.1 节中已知条件得到如下仿真图像,如图 9 所示,图(a)初始星图及直方图,图(b)绕非光轴

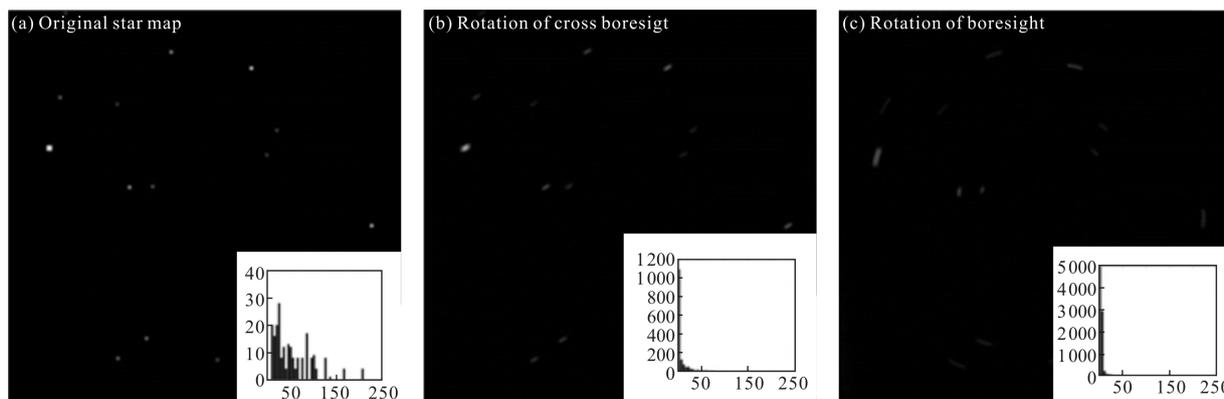


图 9 运动星图及其直方图

Fig.9 Motion maps and their histograms

转动的模糊星图及直方图,图(c)绕光轴转动的模糊星图及直方图。图 10 中(a)简谐振动的模糊星图及直方图,图 10 中(b)两种不同的简谐运动混合的模糊星图及直方图,图 10 中(c)含有角运动和角振动的复合运动模糊星图及直方图。

由图 9、图 10 可知,由于角运动的影响,星图出

现了不同形式的模糊,由直方图可知其灰度值出现了不同程度的下降,这两种退化形式为质心提取带来了困难。

由于现阶段国内深空探测处于理论先行的研究阶段,真实的深空导航星图不易获得,因此文中选用近地轨道卫星所拍摄的实际星图做仿真验证,图 11

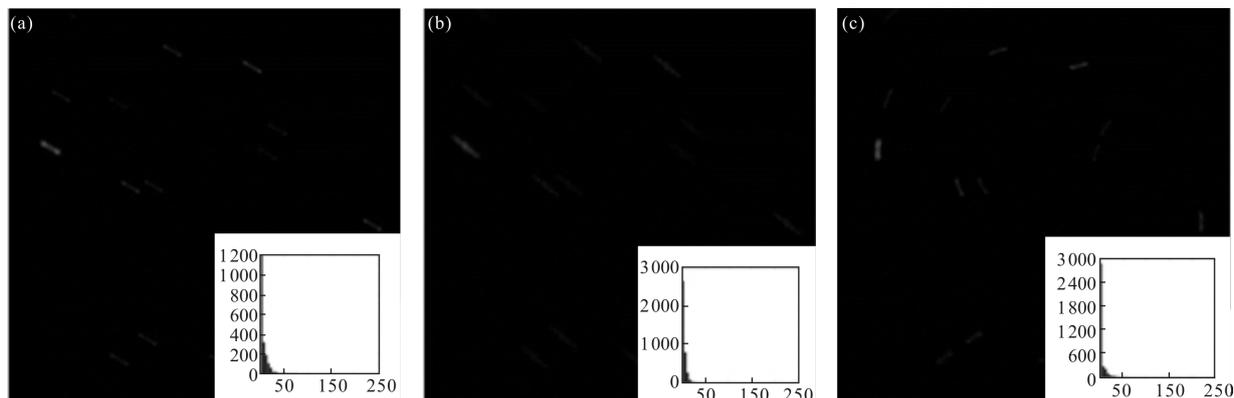


图 10 振动模糊及复合运动模糊星图

Fig.10 Blurred star images caused by the complicated and the vibration motion

为近地卫星长曝光时间下所拍摄的真实模糊星图,运动方向与水平方向成 20° , 模糊长度约为 35 个像素近地卫星所拍摄的真实模糊星图,图 12、图 13 分别为分步模糊及基于可分离模糊核方法仿真得到的模糊星图。根据星敏感器的成像特性,模糊星图能够一定程度的反映星敏感器的运动情况,而从图 12 仿真结果可以看出,星点已被模糊为一片区域而不能反映出其运动轨迹,因此分步模糊方法并不能反映星敏感器的实际运动情况。由图 13 可知,根据文中提出的方法仿真的模糊星点有明显的运动轨迹,并且使用 Radon 变换^[15]对图 13 参数进行估计,得出的模糊长度为 33 个像素,与水平方向夹角为 20.3° ,基本与实际星图相符,因此文中提出的方法能有效描述星敏感器的运动特性并且可以生成接近于真实模糊的星图。

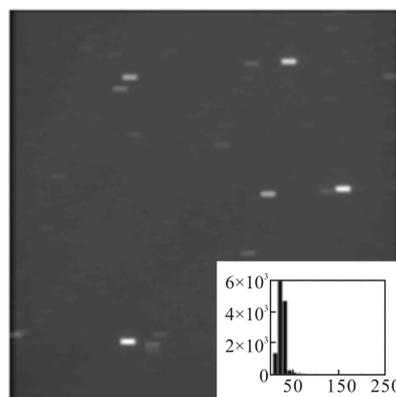


图 12 分步模糊方法的模糊星图及直方图

Fig.12 Blurred star map and its histogram using step-by-step method^[14]

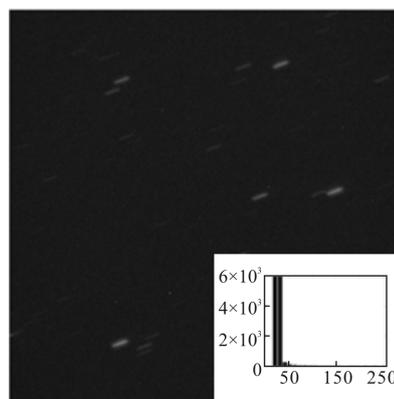


图 13 可分离模糊核方法的模糊星图及直方图

Fig.13 Blurred star map and its histogram using separable blur kernel method

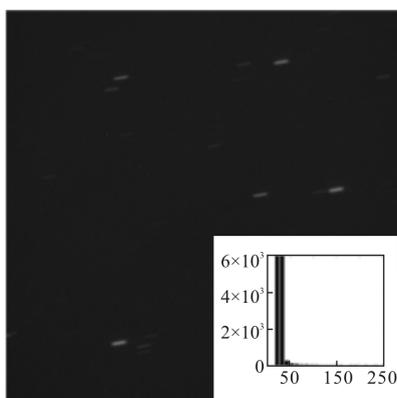


图 11 真实星图及直方图

Fig.11 True star image and its histogram

3.3 运动模糊对星图质心提取精度的影响

当星点信噪比,可用局部熵质心提取方法^[16]对星图进行质心提取与分析,图 14 反映了绕非光轴转

动的不同角度对质心提取精度的影响, 由图可知随着模糊长度的增长, 质心的提取误差在不断增大。由图 15 可知, 绕光轴的旋转运动对质心提取精度有显著的影响, 旋转的角度越大, 质心提取的误差越大, 并且距离中心点越远, 误差越大。图 16 反映了不同频率的振动对星图质心提取精度的影响, 其中横坐标为固定曝光时间内振动的周期数, 由图可知质心提取误差随着振动频率的增加而减小, 当振动频率大于等于曝光时间时, 振动对质心提取精度的影响较小。由图 14~图 16 可见, 星传感器运动会给质心的提取带来较大的影响, 旋转运动对质心提取精度的影响尤为突出, 而当振动频率大于等于曝光时间时, 振动对质心提取精度的影响较小。

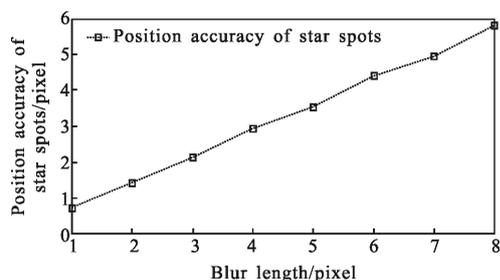


图 14 不同模糊长度时绕非光轴转动对质心提取精度的影响

Fig.14 Influence of cross boresight rotation on star spot centroids with different blur lengths

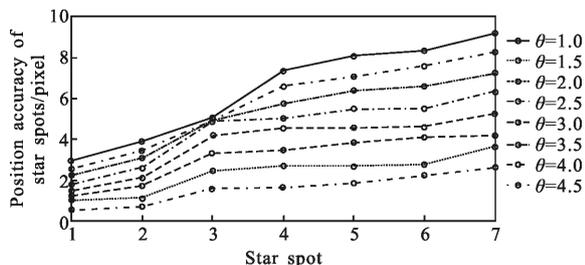


图 15 不同旋转角度的绕光轴转动对质心提取精度的影响

Fig.15 Influence of boresight rotation on star spot centroids with different rotation angles

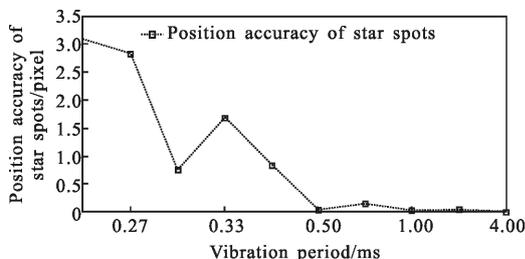


图 16 不同频率的角振动对质心提取精度的影响

Fig.16 Influence of angle vibration on star spot centroids with different amplitudes

4 结论

文中研究复合运动条件下深空探测长焦距、长曝光时间、小视场角星敏感器所获得的模糊降质星图的建模与仿真方法。具体研究了星敏感器角运动及角振动对星敏感器成像的影响, 基于成像的运动模糊机理, 提出了一种新的基于可分离模糊核的建模方法, 可有效仿真星图的复合运动模糊。结果表明, 基于可分离模糊核的仿真星图更能如实地反映星敏感器的运动特性。星敏感器不同的运动形式对质心提取效果的影响不同, 其中绕光轴的旋转对质心提取精度的影响尤为突出。以上结论揭示了不同运动形式对星图像质的影响规律, 为进一步改善星敏感器的动态性能、提高光学天文自主导航的精度提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Bhaskaran S, Riedel J E, Synnott S P, et al. The deep space 1 autonomous navigation system: a post-flight analysis [C]// AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2000, 3935: 42.
- [2] Van bezooijen R W H, Anderson K A, Ward D K. Performance of the AST-201 star tracker for the microwave anisotropy probe[C]//AIAA Guidance and Control Conference, 2002, 4582: 5-8.
- [3] Pasetti A, Habinc S, Creasey R C. Dynamical binning for high angular rate star tracking [C]//Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems, 2000, 425: 255.
- [4] Xiaojuan W, Xinlong W. Multiple blur of star image and the restoration under dynamic conditions [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11): 1903-1913.
- [5] Shen J, Zhang G, Wei X. Simulation analysis of dynamic working performance for star trackers[J]. *JOSA A*, 2010, 27 (12): 2638-2647.
- [6] Fei X, Nan C, Zheng Y, et al. A novel approach based on MEMS -gyro' s data deep coupling for determining the centroid of star spot [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 2012(6): 55-9.
- [7] Wang X, Yi T, Tang Q, et al. Simulation and analysis of vibration blurred images [C]//IEEE Wireless Communications Networking and Mobile Computing(WiCOM), 2010: 1-4.
- [8] Zhang W, Quan W, Guo L. Blurred star image processing for star sensors under dynamic conditions[J]. *Sensors*, 2012,

- 12(5): 6712–6726.
- [9] Sun T, Xing F, You Z, et al. Smearing model and restoration of star image under conditions of variable angular velocity and long exposure time [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6009–6024.
- [10] Wu Xiaojuan, Wang Xinlong. Motion blur of star image and restoration[J]. *Journal of Beihang University*, 2011, 11(37): 23–31. (in Chinese)
吴小娟,王新龙.星图运动模糊及其复原方法[J].北京航空航天大学学报, 2011, 11(37): 23–31.
- [11] Zhang Junping, Lin Tao. A simulation method of CCD map [J]. *China's Space Science and Technology*, 1999, 19(3): 46–50. (in Chinese)
张钧萍,林涛.一种模拟 CCD 星图的方法 [J].中国空间科学技术, 1999, 19(3): 46–50.
- [12] Quan Wei, Fang Jiancheng. High-precision simulation of star map and its validity check [J]. *Photoelectric Engineering*, 2005, 32(7): 22–26. (in Chinese)
全伟,房建成.高精度星图模拟及有效性验证新方法[J].光电工程, 2005, 32(7): 22–26.
- [13] Whyte O, Sivic J, Zisserman A, et al. Non-uniform deblurring for shaken images [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2012, 98(2): 168–186.
- [14] Fang L, Liu H, Wu F, et al. Separable kernel for image deblurring [C]//IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014, 369: 2885–2892.
- [15] Pang Tao, Cheng Xiaoping. The parameter estimation of motion blurred image based on Radon transform [J]. *Science and Technology Project*, 2010, 22(2): 1671–1815. (in Chinese)
庞涛,程小平.基于 Radon 变换的运动模糊图像参数估计 [J].科学与技术工程, 2010, 22(2): 1671–1815.
- [16] Tian Yulong, Wang Guangjun, Fan Jiancheng, et al. A new method of star image high precision extraction based on local entropy [J]. *Journal of Harbin Industrial University*, 2005, 37(8): 1068–1070. (in Chinese)
田玉龙,王广君,房建成,等.基于局部熵的星敏传感器星图提取方法 [J].哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (8): 1068–1070.