

## 一种空间观测图像的仿真生成方法

张健, 娄树理, 任建存

(海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001)

**摘要:** 提出一种天基观测空间目标可见光图像仿真方法, 观测平台及目标的运行速度和空间位置信息由卫星工具包(STK)生成, 成像过程由 Matlab 编程实现。该方法的优越性在于利用 STK 的可视化功能, 控制观测平台和目标的轨道参数, 使目标能够进入观测相机的视场, 而 Matlab 具有强大的图像处理函数库, 在序列图像生成过程中, 可方便地对图像添加各类噪声和效应, 使图像更加真实; 生成的仿真图像主要用于空间目标检测算法的研究。最后分析了仿真图像中空间目标和恒星的运动性质, 为完善空间目标检测算法的性能提供了依据。

**关键词:** 图像仿真; 空间目标检测; 运动性质分析

中图分类号: V271.4; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)11-0018-06

## A Simulation Method for Space Observation Image

ZHANG Jian, LOU Shu-li, REN Jian-cun

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** A visible light image simulation method for space-based observation of space target is presented. The speed and position information of the observation platform and the target is generated by the STK, and the imaging process is implemented by Matlab programming. The superiority of this method is to use the visual function of STK, and the orbital parameters of the observation platform and target can be controlled to make the target enter the FOV of camera. Matlab has a powerful image processing library, which can add all kinds of noises and effects to the image during sequence image generation to make the image more realistic. The generated simulation images are mainly used for research on space target detection algorithm. Finally, the motion properties of space target and the stars in simulation image are analyzed, which provides a basis for improving the performance of space target detection algorithm.

**Key words:** image simulation; space target detection; motion property analysis

### 0 引言

美国天基可见光(SBV)计划<sup>[1]</sup>对天基空间监视的技术和功能进行了首次验证。由于天基探测器视场宽广、测轨精度高,其技术优势非常明显。通过检测天基观测相机拍摄光学图像中的运动目标,可以对目标进行编目从而实现目标的监视。

由于实拍的天基空间目标光学图像难以获得,国内外许多学者对天基观测图像的仿真方法进行了研究。从公开文献看,星空图像仿真的方法主要有以下两类:第一类是面向成像目标的仿真方法;第二类是面

向点目标的仿真方法。第一类方法大都利用到了 OpenGL 的强大功能<sup>[2-5]</sup>,文献[6-7]中还利用 3D MAX 软件创建精确的空间目标三维模型。第二类方法中,文献[8-9]分析了天基光电望远镜对空间目标成像时目标、望远镜、太阳之间的位置关系及其变化对目标光度特征的影响,以及望远镜系统参数对空间目标成像光度特征的影响,通过计算机仿真模拟了目标-星空图,但文献中未考虑卫星姿态调整对恒星和目标在图像中的运动产生的影响;文献[10]利用 STK 输出卫星的姿态参数,利用 Matlab 进行图像仿真,该文献提供了一些借鉴,但可见光图像与红外图像存在较大差异,一些特殊的效果不能仿真出来,另外 STK 直接输出卫星的姿态参数满足不了特殊的指向要求;文献[11]以 SBV 为原型,设计了天基光学监视图像仿真结构和流程,文献中对于空间目标运动拖尾的建模不准确,另外对观测相机的指向与卫星自身姿态之间的关系未做交代;文献[12]也建立起了

收稿日期:2013-11-28

修回日期:2013-12-28

基金项目:国家“八六三”计划资助(2011AA1787);国家自然科学基金(61002006)

作者简介:张健(1979—),男,河南汝州人,博士,研究方向为空间目标检测。

空间目标光学特性仿真系统,对于图像仿真中噪声以及各种效应考虑的不够充分;文献[13]利用一阶贝塞尔函数对恒星的能量在空间上的分布建模,该模型未考虑到光学点扩散函数的影响导致恒星能量在多个像素上的扩散效应。

本文提出一种面向目标检测的天基观测空间目标可见光图像仿真方法,观测平台和目标的运行速度和空间位置信息由 STK 生成,成像过程由 Matlab 编程实现。本文方法的优越性在于利用 STK 的可视化功能,控制目标的轨道参数,使其能够进入观测相机的视场。而 Matlab 具有强大的图像处理函数库,在序列图像生成过程中,可方便地对图像添加各类噪声和效应,使图像更加真实。最终,通过本文方法生成一组包含有空间目标的光学仿真图像,用于空间目标检测算法的研究。

## 1 仿真中的基本坐标系及坐标变换

### 1.1 J2000.0 地心惯性坐标系

J2000.0 坐标系  $O-UVW$  定义为:坐标原点  $O$  为地球质心,基本平面为 J2000.0 地球平赤道面, $U$  轴在平赤道面内指向 J2000.0 平春分点  $\gamma$ , $W$  轴与  $U$  轴垂直指向 J2000.0 北天极  $P$ , $V$  轴在 J2000.0 平赤道面内,与  $U$ 、 $W$  轴按右手法则确定。

### 1.2 观测卫星本体坐标系

观测卫星本体坐标系  $O'-X_a Y_a Z_a$  定义为:坐标原点  $O'$  为观测卫星质心, $Z_a$  轴由观测卫星质心指向地心, $Y_a$  轴指向在轨道面的负法向, $X_a$  轴在轨道面内与  $Z_a$  轴垂直指向观测卫星运动方向。

### 1.3 观测相机坐标系

观测相机坐标系定义为:相机视场方向为  $Z$  轴,CCD 像平面为基本坐标平面, $X$ 、 $Y$  轴与 CCD 像元的排列一致,且  $X$  轴、 $Y$  轴与  $Z$  轴按右手法则确定。

### 1.4 观测平台和目标卫星的空间位置

本文利用 STK 软件的 SGP4/SDP4 模型得到观测平台和目标卫星的瞬时位置矢量  $R_{sat}$ 、 $R_{target}$  和速度矢量  $V_{sat}$ 、 $V_{target}$ 。

### 1.5 太阳光的入射方向

太阳直射点的平赤纬角和平赤经角分别用  $\alpha_s$  和  $\delta_s$  表示,在 J2000.0 地心惯性坐标系下太阳入射方向的单位矢量可以表示为

$$R_{sun} = \begin{pmatrix} \cos \delta_s \cos \alpha_s \\ \cos \delta_s \sin \alpha_s \\ \sin \delta_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

### 1.6 J2000.0 坐标系到星体坐标系的转换

坐标系  $O-UVW$  和  $O'-X_a Y_a Z_a$  之间的坐标转换如图 1 所示。

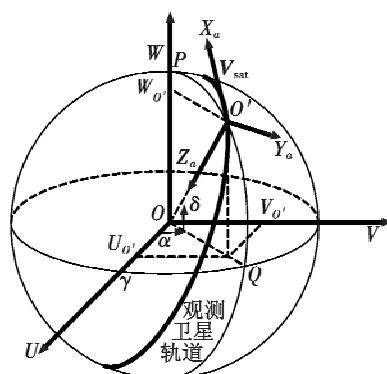


图 1 J2000 坐标系和星体坐标系

Fig. 1 J2000 and star coordinate systems

由观测卫星在  $O-UVW$  中的位置矢量  $R_{sat}$ ,可求得观测卫星当前时刻的赤经  $\alpha$  和赤纬  $\delta$ 。

得到赤经和赤纬后,令  $(X_a Y_a Z_a)^T$  为星体坐标系中的坐标,即

$$\begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix} = R_{wv,w_s} \cdot \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_{sat} \\ V_{sat} \\ W_{sat} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中,  $R_{wv,w_s}$  为  $O-UVW$  到  $O'-X_a Y_a Z_a$  的旋转矩阵。

### 1.7 星体坐标系到相机坐标系的转换

观测相机视场指向在星体坐标系中的方位角和俯仰角分别定义为  $Az$  和  $El$ 。

观测相机坐标系  $O'-XYZ$  可按照图 2 中建立:假定相机坐标系的中心  $O'$  与星体坐标系的中心重合, $O'Z$  为观测相机视场指向。 $O'Y$  轴在星体坐标系的  $X_a O' Y_a$  平面内, $O'Y$  轴与  $O'Y_a$  轴的夹角为  $Az$ , $O'Z$  轴与其在  $X_a O' Y_a$  平面内投影的夹角为  $El$ 。 $O'X$  轴按照右手法则定义。

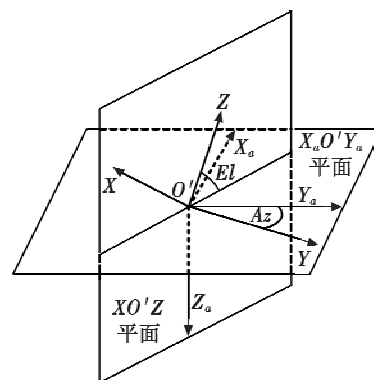


图 2 星体坐标系和观测相机坐标系

Fig. 2 Star and camera coordinate systems

令  $(X Y Z)^T$  为相机坐标系中的坐标,根据式(2),总的转换公式为

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_{Y_a X_a Y_a Z_a} \cdot \left( R_{wv,w_s} \cdot \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_{sat} \\ V_{sat} \\ W_{sat} \end{pmatrix} \right) \quad (3)$$

式中,  $R_{Y_a X_a Y_a Z_a}$  为  $O'-X_a Y_a Z_a$  到  $O'-XYZ$  的旋转矩阵。

## 1.8 相机坐标系到图像坐标系的转换

当观测相机视场角较小时,可以用图 3 中的小孔成像模型来计算目标的成像位置 $(x,y)$ 。最终,可求得图像坐标系中的坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{N_x/2}{\tan(x_{\text{FOV}}/2)} \cdot \frac{X}{Z} \\ y = \frac{N_y/2}{\tan(y_{\text{FOV}}/2)} \cdot \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_{\text{FOV}}$ 和 $y_{\text{FOV}}$ 分别为相机 $x$ 和 $y$ 方向的视场角; $N_x \times N_y$ 为 CCD 的分辨率。

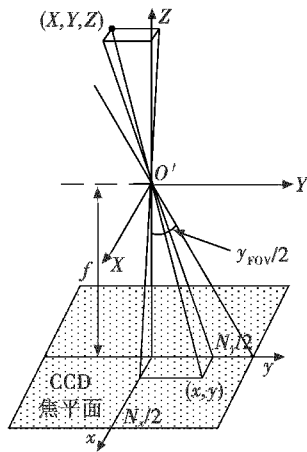


图 3 观测相机小孔成像模型

Fig. 3 Sketch map of pinhole imaging

## 2 背景恒星的仿真

恒星与观测卫星的距离遥远,导致恒星在图像中产生运动的原因是相机视场指向的改变。观测图像背景恒星的仿真流程如图 4 所示。

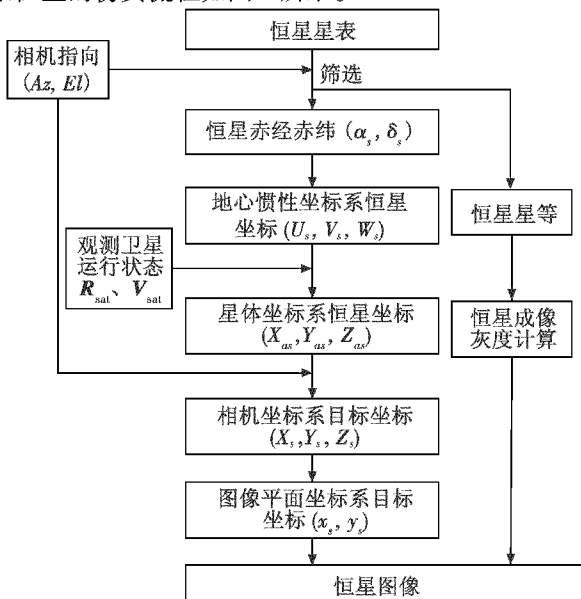


图 4 恒星成像仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of star imaging simulation

## 2.1 星表的选取

本文采用史密松天体物理台(SAO)星表,由于恒星数量较大,本文根据恒星的赤经、赤纬值,将SAO星表分成8个子星表。分割之后,8个子星表的恒星数量都大大减少,其中恒星数量最多的子星表包含了39009颗恒星,使得对恒星遍历的时间大大缩短。

## 2.2 恒星成像位置计算

恒星的视向量可以由该恒星的经度和纬度来表示。设某恒星的坐标为 $(\alpha_{\text{star}}, \delta_{\text{star}})$ ,将恒星映射到单位球面,得到该星在J2000.0地心惯性坐标系下的单位向量为

$$\mathbf{R}_{\text{star}} = \begin{pmatrix} U_{\text{star}} \\ V_{\text{star}} \\ W_{\text{star}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{\text{star}} \cdot \cos \alpha_{\text{star}} \\ \cos \delta_{\text{star}} \cdot \sin \alpha_{\text{star}} \\ \sin \delta_{\text{star}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

计算得到恒星在相机坐标系的坐标为

$$\begin{pmatrix} X_{\text{star}} \\ Y_{\text{star}} \\ Z_{\text{star}} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{Y_a X_{a1} Y_{a2}} \cdot \mathbf{R}_{W V_1 W_2} \cdot \begin{pmatrix} U_{\text{star}} \\ V_{\text{star}} \\ W_{\text{star}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据式(4)可求得恒星在图像坐标系中的坐标。

## 2.3 恒星成像灰度计算

实际中星等与亮度的关系是:“星等每降低一等,亮度增加为前一星等的2.51倍”,文献[14]中便是根据这一关系构造了星等 $m$ 到灰度 $A$ 的变换公式。其具体做法是,规定星等为5时,对应灰度值为65535,那么星等为 $m$ 时,其对应的灰度值 $A$ 为

$$A = \frac{255}{2.51^{m-5}} \quad (7)$$

## 2.4 星像点高斯灰度扩散法

由于观测相机的散焦作用,恒星成像的半径大小为3~4个像元<sup>[15]</sup>,需要对模拟星像点做灰度扩散,通常认为恒星星像的灰度分布符合以 $(x_0, y_0)$ 为中心的二维高斯分布<sup>[16]</sup>,任意像素 $(x_i, y_i)$ 处的灰度值 $g_{ij}$ 通过计算得到<sup>[17]</sup>,即

$$g_{ij} = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{(x_i - x_p - \Delta x)^2 + (y_i - y_p - \Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

式中: $(x_p, y_p)$ 为对恒星映射坐标 $(x_0, y_0)$ 取整后,得到的散焦像点的中心像素坐标; $\Delta x = x_0 - x_p$ 和 $\Delta y = y_0 - y_p$ 分别为像素坐标的偏差。

## 3 空间目标的仿真

空间目标与观测相机相对较近,其在观测图像中往往具有相对恒星运动的性质。目标与观测卫星的距离约为40000 km,在这个距离上可以认为目标是一个点目标,点目标的仿真流程与恒星类似,区别在于需要根据太阳光的入射方向计算目标等效星等。

### 3.1 目标成像位置计算

由某时刻目标位置矢量  $R_{target}$ , 再按照计算恒星像位置的方法可以得到目标的星像位置。

### 3.2 目标成像灰度计算

空间目标的亮度主要来自太阳的反射光, 文献 [18] 给出了目标视星等的估算算式为

$$m = -26.58 - 2.5 \cdot \lg \frac{A \cdot \rho \cdot F(\sigma)}{R^2} \quad (9)$$

式中:  $m$  为空间目标星等;  $A$  为截面积;  $\rho$  为表面反射率;  $F(\sigma)$  为相位角函数; 相位角定义为观测相机、目标、太阳之间的夹角;  $R$  为观测相机与目标之间的距离。

将目标视为等效反射球体, 利用式 (9) 计算出目标卫星的等效星等, 再利用式 (7) 计算其灰度值, 最后利用高斯灰度扩散法, 就可得到目标的仿真图像。

## 4 面向目标检测的图像仿真

### 4.1 卫星轨道参数

参照 SBV 卫星的轨道参数, 轨道类型为太阳同步轨道, 目标设定为地球同步轨道 (GEO) 卫星。

### 4.2 观测相机参数

仿真相机视场角为  $3^\circ$ , 图像分辨率为  $1024 \times 1024$ , 仿真图像位数为 16 bit, 仿真最大星等为 12 星等。

### 4.3 仿真结果

图 2 中观测相机的指向  $O'Z$  可根据不同的观测模式来确定。本文只介绍自然拍摄观测模式, 该模式下  $O'Z$  始终与轨道面垂直。观测卫星视场与 GEO 目标一次交会的仿真时间开始时刻为“2013-07-01 13:03:48.000”, 结束时刻为“2013-07-01 13:06:48.000”, 持续时长 180 s。若仿真步长设为 1 帧/3 s, 则一共生成 61 幅仿真图像。表 1 列出部分恒星的位置和灰度值。

表 1 第 1 帧图像中恒星的位置和灰度计算结果

Table 1 Location and grayscale of stars in frame 1

No.	赤经/ ( $^\circ$ )	赤纬/ ( $^\circ$ )	X 坐标/ 像素	Y 坐标/ 像素	星等	灰度值
124139	4.97	0.14	68.74	43.81	9	1651
124144	4.98	0.14	91.54	60.10	9	1651
124158	4.98	0.14	213.24	64.61	9	1651
124172	4.98	0.14	270.69	92.87	9	1651
124180	4.98	0.15	11.94	382.84	8	4144
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

自然拍摄观测模式仿真图像共 61 帧, 图 5 给出了其中的 2 幅, 其中, 白色方框标记为目标, 图 5c 为所有帧对应像素取最大值叠加后的效果图。

表 2 给出星表编号为 124206 的恒星的坐标信息和目标的坐标信息。恒星的平均帧间运动距离约为 0.99

像素, 目标的平均帧间运动距离约为 17.04 像素。

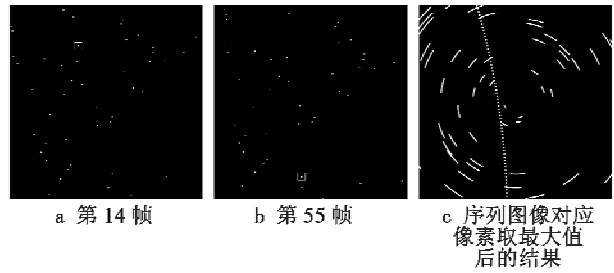


图 5 自然拍摄观测模式仿真序列图像

Fig.5 Simulation frames under natural shooting mode

表 2 恒星和目标的帧间运动距离

Table 2 The movement of stars and target between neighboring frames

图像帧号	GEO 目标坐标		恒星坐标	
	x/像素	y/像素	x/像素	y/像素
1	308.70	1.72	266.78	327.02
2	313.34	17.96	267.36	326.22
3	317.90	34.22	267.95	325.43
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59	466.22	976.94	304.71	284.28
60	466.91	994.19	305.43	283.60
61	467.52	1011.46	306.15	282.93
平均帧间运动速度(像素/帧)	2.65	16.83	0.66	-0.73
均方差/(像素/帧)	17.04		0.99	

## 5 目标与背景恒星的运动性质分析

### 5.1 运动性质分析

由图 5 可知, 自然拍摄观测模式下, 仿真得到的序列图像中, 目标与恒星在图像中的运动性质不同: 恒星的轨迹近似为绕图像中心旋转的圆弧, 而目标的轨迹近似直线。这是由于自然拍摄观测模式下, 相机视场指向始终为  $Az = 90^\circ, El = 0^\circ$ , 且垂直于轨道面, 随着卫星运动, 相机坐标系存在绕视轴的旋转, 导致图像中恒星轨迹绕视场中心旋转。观测卫星运行周期约为 98 min, 而该段仿真过程中目标在视场内出现的时间约为 3 min, 因此, 短时间内目标的轨迹弧度较小, 近似直线。

可以从相机视场指向的旋转情况进一步研究目标与恒星的运动性质。图 6 分别给出了相邻帧间, 相机坐标系  $X、Y、Z$  轴在 J2000.0 地心惯性坐标系下指向的变化情况。

由图 6a 和图 6b 可知,  $X$  轴和  $Y$  轴方向在相邻帧间存在变化, 两者的变化量相等, 且为常数, 这使得目标的运动轨迹带有一定弧度。由图 6c 可知,  $Z$  轴方向不变, 说明相机坐标系绕  $Z$  轴匀速旋转, 恒星轨迹为绕图像中心旋转的圆弧。

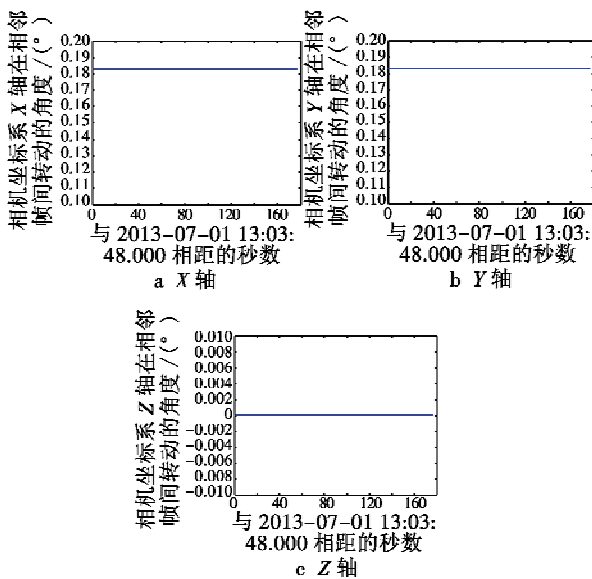


图 6 相机坐标系的旋转情况

Fig. 6 Rotation of camera coordinate system

## 5.2 运动模糊分析

运动模糊是由目标或恒星相对图像坐标系的运动引起的。运动模糊的长度和方向分别为

$$L_{\text{blur}} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}$$

$$D_{\text{blur}} = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (10)$$

式中,  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  表示相邻两帧图像中的坐标。根据以上两个参数可利用 Matlab 卷积运算对目标图像加上运动模糊效应。

最终, 将目标图像和恒星图像对应像素取最大值融合, 加上光学系统的畸变和噪声就完成了图像仿真。

## 5.3 太阳相位角变化情况

目标的亮度主要与观测相机之间的距离以及太阳相位角有关。仿真过程中太阳相位角的变化如图 7 所示。

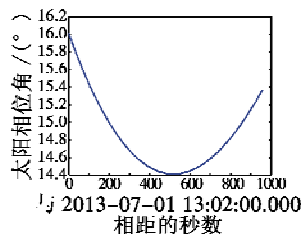


图 7 太阳相位角的变化曲线

Fig. 7 Change of solar phase angle with time

由图 7 可知, 仿真过程中通过对观测卫星和目标卫星轨道参数的设置, 使得太阳相位角保持在  $14^\circ$  到  $16^\circ$  范围内。较小的相位角可使观测相机接收到的目标反射太阳辐射能量更高, 从而使目标的信噪比更高, 更容易被检测到。

## 6 结束语

目前, 空间目标检测是天基空间目标监视领域的重要研究方向。由于空间观测图像全局运动复杂多变, 基于运动性质的目标检测具备非常大的优势。本文给出了一种面向目标检测的天基观测 GEO 卫星序列图像仿真方法, 并且分析了图像中恒星和目标各自的运动性质。通过研究发现, 与地基观测图像相比, 天基观测图像中目标和恒星各自的运动性质存在明显差别, 背景恒星和目标的运动轨迹均存在一定弧度。因此, 在对目标进行检测之前, 需要求取图像的全局运动参数, 然后对图像实施配准。天基观测图像的全局运动中包含有规律的旋转因素, 这在以往的空间目标检测算法中从未遇到。因此通过本文的研究, 也给基于运动信息的空间目标检测算法提出了新的要求。

## 参考文献

- [1] STOKES G H, VON BRAUN C, SRIDHARAN R, et al. The space-based visible program[J]. Lincoln Laboratory Journal, 1998, 11(2):205-238.
- [2] 陈文彤, 刘朝军, 陈曾平. 基于 OpenGL 的空间目标观测可视化仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3):567-569.
- [3] 韩意, 孙华燕, 李迎春, 等. 基于 OpenGL 的空间目标图像生成方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(6):267-270.
- [4] 韩意, 孙华燕, 李迎春, 等. 空间目标天基光学观测的序列图像仿真方法[J]. 光学技术, 2010, 36(1):93-97.
- [5] 程军, 张伟, 鲍文卓, 等. 在轨光学相机探测图像数字仿真系统的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9):2136-2144.
- [6] 杨长才, 田金文, 叶瑾, 等. 天基光学成像系统空间目标成像模拟技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9):2410-2414.

- gets imaging for a space based optical imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9):2410-2414.
- [7] 杨非,刘晨霞. 星空背景下空间碎片的图像仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(5):1336-1342.  
YANG F, LIU C X. Image simulation approach of targets in celestial background [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(5):1336-1342.
- [8] 彭华峰,陈鲸,张彬. 空间目标在天基光电望远镜中的光度特征研究[J]. *光电工程*, 2006, 33(12):9-14.  
PENG H F, CHEN J, ZHANG B. Luminant characteristic of space target in space-based opto-electronic telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(12):9-14.
- [9] 彭华峰,陈鲸,张彬. 天基光电望远镜对空间目标成像的模拟[J]. *光电工程*, 2005, 32(10):14-17.  
PENG H F, CHEN J, ZHANG B. Imaging simulation for space target on space-based opto-electronic telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(10):14-17.
- [10] 李克新,丛明煜,张伟,等. 深空背景点目标红外序列图像生成[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12):3062-3068.  
LI K X, CONG M Y, ZHANG W, et al. Infrared sequence image generation of point target in deep space [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(12):3062-3068.
- [11] 李骏,高源,安玮,等. 天基光学空间目标监视图像仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(15):3951-3954.  
LI J, GAO Y, AN W, et al. Study of simulation of space-based optical surveillance images[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(15):3951-3954.
- [12] 曾德贤,杜小平. 天基空间目标光学观测的仿真与可视化[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(s1):209-211.  
ZENG D X, DU X P. The simulation and visualization of space-based optic surveillance for space objects [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(s1):209-211.
- [13] 张伟,潘海斌,鲍文卓,等. 星空背景数字图像的生成[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):676-682.  
ZHANG W, PAN H B, BAO W Z, et al. Digital image generation of star map [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3):676-682.
- [14] 欧阳桦. 基于 CCD 星敏感器的星图模拟和导航星提取的方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.  
OUYANG H. Research on star image simulation and star extraction method for CCD's star tracker [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [15] 魏新国,张广军,江洁. 星敏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.  
WEI X G, ZHANG G J, JIANG J. Subdivided locating method of star image for star sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(9):812-815.
- [16] LIEBE CARL CHRISTIAN. Accuracy performance of star trackers-a tutorial [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2):587-599.
- [17] 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.  
WANG H Y, FEI Z H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7):1672-1677.
- [18] 陈荣利,韩乐,车驰骋,等. 非自发光空间目标的可见光探测技术研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(9):1438-1440.  
CHEN R L, HAN L, CHE C C, et al. Research on unilluminant space target visual detection technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9):1438-1440.

(上接第 17 页)

- [3] 郭锁凤,申功璋,吴成富,等. 先进飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2003:246-290.  
GUO S F, SHEN G Z, WU C F, et al. Advanced flight control system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003:246-290.
- [4] CHEN W H. Disturbance observer based control for nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(4):706-710.
- [5] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1990:28-30.  
GAO W B. Theoretic foundation of variable structure control [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1990:28-30.
- [6] 陈谋. 不确定非线性综合火力/飞行/推进系统鲁棒控制方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2004.  
CHEN M. Research on robust control method for uncertain nonlinear integrated fire/flight/propulsion system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [7] HALL C E, SHTESSEL Y B. Sliding mode disturbance observer-based control for a reusable launch vehicle [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(6):1315-1328.
- [8] LEVANT A. Universal single-input-single-output (SISO) sliding-mode controllers with finite-time convergence [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(9):1447-1451.