空间碎片在轨识别与精确定位方法

翟 光,赵 琪,张景瑞

(北京理工大学 宇航学院,北京 100081)

摘 要:提出了一种基于可见光相机与激光测距仪的空间碎片在轨识别与定位方法。空间碎片的相对速度、距离等因素直接影响碎片成像轨迹。为完成帧间匹配,采用与轨迹边缘具有等价二阶中心矩的椭圆描述其特征,并以此制定帧间匹配准则。通过帧间匹配,即可获得图像中碎片的坐标,解算出碎片方位角。当仅有测角信息时,采用位置-速度滤波算法,引导激光测距仪对目标相对距离进行测量;当同时具备测角信息与测距信息时,采用扩展 Kalman 滤波算法对目标进行滤波定位,并获得高精度的目标运动状态信息。

关键词:空间碎片; 在轨识别; 二阶中心矩; 扩展卡尔曼滤波; 精确定位

中图分类号:TP24 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.S129001

On-board space debris recognition and accurate positioning method

Zhai Guang, Zhao Qi, Zhang Jingrui

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A method of detecting and recognizing space debris based on visible light camera and laser range finder was proposed in this paper. The shape of imaging was determined by the relative velocity, and distance of space debris. In order to matching different images, an ellipse that had the same second-order central moment was adopted to describe the edge of image. Based on the features of ellipse, the rules of matching images will be established. By matching different images, the coordinate and azimuth angles can be calculated. If only the azimuth angles were available, the relative position-velocity filter was used for guiding the laser range finder. When the laser range finder worked properly, the extend-Kalman filter was used for getting accurate movement information of the target.

Key words: space debris; on-board debris recognition; second-order central moment; extend-Kalman filter; accurate positioning

收稿日期:2016-01-05; **修订日期**:2016-02-03

基金项目:国家 863 计划(2015AA7046408)

作者简介:翟光(1979-),男,副教授,主要从事航天器制导、导航与控制技术方面的研究。Email:gzhai@bit.edu.cn

通讯作者:赵琪(1991-),男,硕士生,主要从事计算机视觉测量方面的研究。Email:zhaoqibit@163.com

0 引 言

空间技术的快速发展使得空间碎片数量急剧上升,这些碎片对在轨航天器造成的威胁越来越大。截止到 2013 年 1 月,美国通过地面监测编号的碎片数量已达 16 686 个[1]。为避免与空间碎片相撞,航天器有时需要进行轨道机动躲避碎片。2014 年 10 月 27 日,国际空间站(ISS)为躲避一个直径 8 cm 的碎片进行了变轨[2]。

目前,对空间碎片探测定位主要采用地基观测方式,地基观测主要分为地基雷达观测和地基光学观测两种方式。但地基观测容易受地球曲率、大气折射、天气、观测时间窗口等条件限制,所以地基观测一般仅限于直径大于 10 cm 的碎片[3-4]。

近年来,天基观测的方式受到人们越来越多的关注[5]。相比于地基观测,天基观测实时性更好,且不受气象条件、地理位置等限制,观测得到的信号信噪比高,能观测较小的目标。

文中将讨论以星载可见光相机与激光测距仪为测量仪器,基于可见光相机的测角信息,通过位置-速度滤波获得目标方位角与方位角速度,进而引导激光测距仪完成测距。结合测角信息与测距信息,采用扩展 Kalman 滤波算法对目标进行滤波定位,从而获得目标较高精度的位置与速度信息。最后,通过数值仿真对该方法进行了验证。

1 图像模拟与识别

1.1 天基光学图像模拟

天基观测系统相对测量几何模型如图 1 所示。

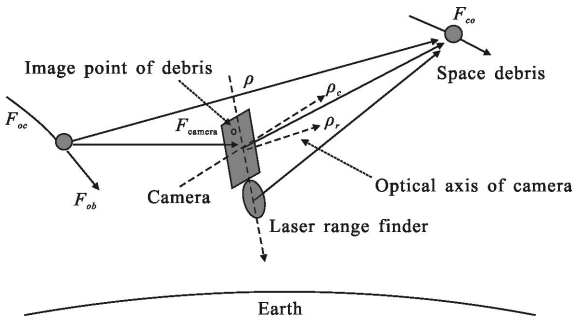


图 1 相对测量几何模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of relative measurement model

其中,F_{ob} 和 F_{oc} 分别为航天器轨道坐标系和本体坐标系,ρ_r、ρ_c 和 ρ 分别为碎片在激光测距仪及相机坐标系、目标航天器轨道坐标系内的相对位置矢量,ρ_f 为相机安装偏置矢量。在 ρ_f 较小的情况下,ρ_r、ρ_c 和 ρ 可视为同一向量。

为便于研究,假设 ρ_c 和 ρ 为同一向量,结合针孔成像模型定义图 2 所示坐标系[6]:

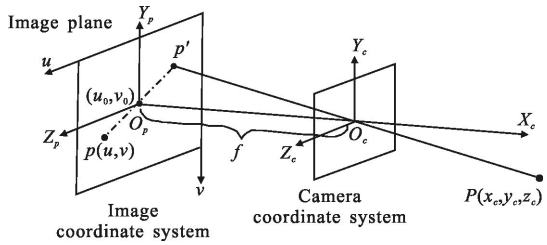


图 2 相机成像模型

Fig.2 Camera imaging model

图 2 中,O_c-$X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系,O_cX_c 为相机光轴,O_cY_c 垂直于光轴向上,O_cZ_c 由右手定则确定;f 为相机焦距,O_p-$X_pY_pZ_p$ 为理想图像坐标系,O_pX_p 与 O_cX_c 重合,O_pY_p、O_pZ_p 分别于 O_cY_c、O_cZ_c 平行;(u,v)为数字图像坐标系,表示以像素为单位的图像坐标系坐标。由比例关系,可得相机坐标系下碎片位置 $P(x_c,y_c,z_c)$ 与理想图像坐标系下成像点 $p(y_p,z_p)$对应关系为:

$$\begin{cases} y_p=\dfrac{y_c}{x_c}\cdot f \\ z_p=\dfrac{z_c}{x_c}\cdot f \end{cases} \tag{1}$$

记 CCD 面阵为 $m_u\times m_v$ 像素,每个像素点物理几何尺寸为 $\mathrm{d}Y\times\mathrm{d}Z$,结合公式(1),得:

$$\begin{cases} u=\dfrac{z_p}{\mathrm{d}Z}+\dfrac{m_u}{2}+0.5=\dfrac{z_c}{x_c}\cdot\dfrac{f}{\mathrm{d}Z}+\dfrac{m_u}{2}+0.5 \\ v=-\dfrac{y_p}{\mathrm{d}Y}+\dfrac{m_v}{2}+0.5=-\dfrac{y_c}{x_c}\cdot\dfrac{f}{\mathrm{d}Y}+\dfrac{m_v}{2}+0.5 \end{cases} \tag{2}$$

式中:加 0.5 是为将坐标原点转到图像中心。因相机曝光时间短,假设在拍照过程中目标做匀速直线运动,根据碎片相对于相机的运动状态矢量$(x_p,y_p,z_p,\dot{x}_p,\dot{y}_p,\dot{z}_p)^{\mathrm{T}}$,得曝光时间 t_{ep} 后目标相对位置矢量为$(x_p+\dot{x}_p\cdot t_{\mathrm{ep}},y_p+\dot{y}_p\cdot t_{\mathrm{ep}},z_p+\dot{z}_p\cdot t_{\mathrm{ep}})^{\mathrm{T}}$,由公式(2),即可得到目标成像的首尾坐标。之后,根据目标尺寸及目标在各个像素停留时间计算灰度值[7]。

1.2 碎片成像特征提取

因不同碎片的尺寸、相对于相机的距离、速度等不

同,导致碎片在相机中所成的像轨迹存在差异。因此,需要提取出碎片成像轨迹的特征,用于碎片的帧间匹配。

图 3 示出两种典型目标轨迹,目标(1)与(2)面积相同,但二者的几何特征明显不同。注意到碎片轨迹近似为椭圆,所以考虑用具有相等二阶中心矩的椭圆近似描述碎片轨迹。

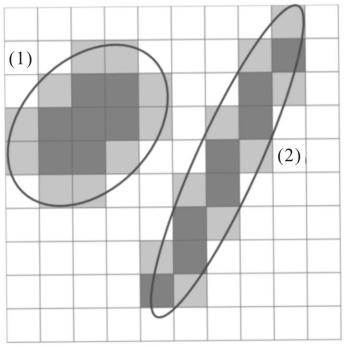


图 3 两种典型目标轨迹示意图

Fig.3 Schematic diagram of two typical target trails

为便于描述二者的特征,首先采用 Canny 算子对成像轨迹进行边缘检测[8],之后,计算与边缘具有相等二阶中心矩的椭圆[9-11]。

有界二维函数 $f(x,y)$ 的 (p,q) 阶原点矩为:

$$m_{pq}=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}x^p y^q f(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad p,q\in\{0,1,2,\cdots,n\} \tag{3}$$

文中,边缘检测结果为离散的点,且边缘都置为 1,所以公式(3)可表示为:

$$m_{p,q}=\sum_{u=1}^{n1}\sum_{v=1}^{n2}u^p v^q \quad p,q\in\{0,1,2,\cdots,n\} \tag{4}$$

形心坐标 (u_c,v_c) 表达式为:

$$u_c=\frac{m_{10}}{m_{00}},\ v_c=\frac{m_{01}}{m_{00}} \tag{5}$$

由公式(4)、(5),(p,q) 阶中心矩 μ_{pq} 为:

$$\mu_{pq}=\sum_{u=1}^{n1}\sum_{v=1}^{n2}(u-u_c)^p(v-v_c)^q \quad p,q\in\{0,1,2,\cdots,n\} \tag{6}$$

记椭圆长半轴为 a,短半轴为 b,椭圆长轴与数字图像坐标系横轴 u 的夹角为 θ,得:

$$\begin{cases} a=\{2[\mu_{20}+\mu_{02}+\sqrt{(\mu_{20}-\mu_{02})+4\mu_{11}^2}]/\mu_{00}\}^{1/2} \\ b=\{2[\mu_{20}+\mu_{02}-\sqrt{(\mu_{20}-\mu_{02})+4\mu_{11}^2}]/\mu_{00}\}^{1/2} \\ \theta=\dfrac{1}{2}\arctan[2u_{11}/(u_{20}-u_{02})] \end{cases} \tag{7}$$

根据公式(7),与目标边缘具有相同二阶中心矩的椭圆离心率 $e=\sqrt{a^2+b^2}/a$。根据这些特征,可以对碎片成像轨迹进行描述,这些特征将用于碎片帧间匹配准则的制定。

1.3 帧间匹配

相机拍照时,在相机视场内可能出现多个目标,如图 3 所示。因此,需要进行帧间匹配,使不同帧中的目标相互对应。除此之外,帧间匹配还可以提供目标运动的角速度信息,剔除虚假目标。

选取碎片成像零阶原点矩(面积)m_{00}、与碎片成像轨迹边缘具有相同二阶中心矩椭圆的长半轴 a、长轴与 u 轴的夹角 θ、离心率 e 作为帧间匹配准则的制定依据。由于星载相机拍照时间间隔很短,同一碎片的上述 4 个特征量在相邻帧中几乎不变,因此,可针对 4 个特征量分别取一较小阈值,匹配过程中,当前帧图像中一个轨迹若与上一帧图像中的某个轨迹的特征量偏差小于设定的阈值,则可认为两个轨迹对应的碎片为同一碎片;否则,为不同碎片。

如图 4 所示,(1-1)、(1-2)为同一碎片在相邻帧的轨迹,(2-1)、(2-2) 为另一碎片在相邻帧的轨迹,帧间匹配过程中,若将(1-1)与(2-2)进行匹配,由于二者 m_{00}、a、θ、e 存在较大差距,所以无法匹配为同一碎片。由于外界干扰及系统噪声,可能在上一帧形成(3-1)所示的虚假目标,而在当前帧没有轨迹与之匹配,所以,该虚假目标被剔除。

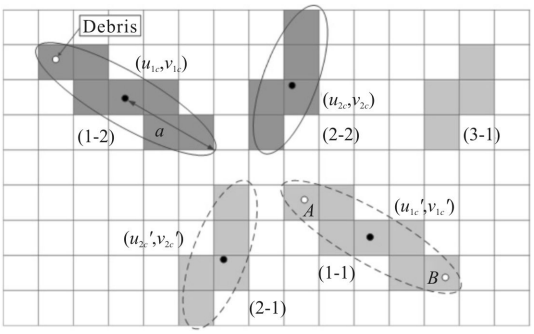


图 4 帧间匹配示意图

Fig.4 Schematic diagram of frame matching

除此之外,还需要对碎片空间位置进行限制。如图 3 所示,由于碎片在相机曝光时间内移动的距离近似等于椭圆长轴,所以,根据碎片成像轨迹半长轴 a、相机曝光时间 t_{ep}、相机拍照间隔 t_{in},对相邻帧碎片轨迹形心距离进行限制:

$$l_{\text{thr}}=(t_{\text{ep}}+t_{\text{in}})\cdot\frac{2a}{t_{\text{ep}}}+\delta_l \tag{8}$$

式中：δ_l 为相邻帧碎片形心距离阈值冗余量。当相邻帧图像中碎片形心距离大于该阈值，则认为两个轨迹对应的碎片为不同碎片。

经帧间匹配，即可确定碎片运动方向，从而可以解算碎片在拍照结束时刻的位置。如图 4 所示，(1-1)为上一帧碎片成像轨迹、(1-2)为当前帧碎片成像轨迹。通过帧间匹配，可得碎片运动方向，从而确定当前帧拍照结束时刻碎片位置：

$$\begin{bmatrix}u_t\\v_t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_{1c}\\v_{1c}\end{bmatrix}+\frac{t_{\text{ep}}}{2(t_{\text{ep}}+t_{\text{in}})}\cdot\begin{bmatrix}u_{1c}-u_{1c}'\\v_{1c}-v_{1c}'\end{bmatrix} \tag{9}$$

2 碎片方位角解算

2.1 方位角定义

根据帧间匹配结果，可见光相机对点目标质心、拖尾目标末端方位角 α、β 进行测量，方位角定义如图 5 所示。

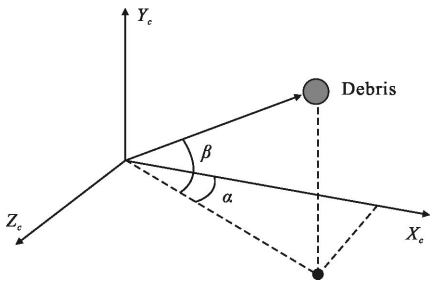


图 5 方位角测量几何模型

Fig.5 Geometric model of azimuth measurement

记目标在相机坐标系下的位置矢量为 $\rho_c(x_c,y_c,z_c)^{\text{T}}$，则测量所得方位角 α_m、β_m 和距离可表示为：

$$\begin{cases}\alpha_m=\alpha+v_\alpha=\arctan(z_c/x_c)+v_\alpha\\ \beta_m=\beta+v_\beta=\arctan(y_c/\sqrt{x_c^2+z_c^2})+v_\beta\end{cases} \tag{10}$$

式中：α_m、β_m 为实际测量值；α、β 为真实方位角；v_i 分别表示各测量量的误差，其均值和方差均可通过大量地面测试得到。

2.2 位置-速度滤波算法

因航天器相对运动学表现为大周期的简谐振荡，所以在短时间内可假设目标面内角速度 $\dot{\alpha}$、面外角速度 $\dot{\beta}$ 为常数[12]。在仅有方位角时，目标近似动力学模型和测量方程可表示为：

$$\begin{pmatrix}\alpha(k+1)\\ \dot{\alpha}(k+1)\\ \beta(k+1)\\ \dot{\beta}(k+1)\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}1&T&0&0\\0&1&0&0\\1&0&1&T\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\alpha(k)\\ \dot{\alpha}(k)\\ \beta(k)\\ \dot{\beta}(k)\end{pmatrix}+\begin{bmatrix}0&0\\T&0\\0&0\\0&T\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\gamma_1(k)\\ \gamma_2(k)\end{pmatrix}$$

$$Z_k=(\alpha(k),\beta(k))^{\text{T}}+V_k \tag{11}$$

式中：T 为滤波步长，$\gamma(k)$ 和 V_k 分别为系统噪声和测量噪声。噪声统计特性为：

$$E\{\gamma(k)\}=0,E\{\gamma(k)\gamma(j)\}=Q_k\delta_{kj}$$
$$E\{v(k)\}=0,E\{v(k)v(j)\}=R_k\delta_{kj}$$
$$E\{v(k)\gamma(k)^{\text{T}}\}=0 \tag{12}$$

设系统状态向量 $X_{k+1}=(\alpha,\dot{\alpha},\beta,\dot{\beta})^{\text{T}}$，$P_k$ 为滤波过程的方差矩阵，第 $k+1$ 次估计由下式描述：

$$\hat{X}_{k+1}=(I-K_{k+1}H_k)\Phi_{k+1/k}\hat{X}_k+K_{k+1}Z_{k+1} \tag{13}$$

式中：Φ_k 为公式(11)中的系统矩阵；H_k 为测量矩阵，这里为二维单位矩阵；K_{k+1} 为增益矩阵。预测方差的递推方程为：

$$\begin{cases}P_{k+1/k}=\Phi_{k+1/k}P_k\Phi_{k+1/k}^{\text{T}}+\Gamma Q_k\Gamma^{\text{T}}\\ P_{k+1}=[I-K_{k+1}H_{k+1}]P_{k+1/k}[I-K_{k+1}H_{k+1}]^{\text{T}}+K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^{\text{T}}\end{cases} \tag{14}$$

式中：Γ 为误差转移矩阵。增益矩阵的递推方程为：

$$K_{k+1}=P_{k+1/k}H_{k+1}^{\text{T}}(H_{k+1}P_{k+1/k}H_{k+1}^{\text{T}}+R_k)^{-1} \tag{15}$$

经位置-速度滤波，可获得更高精度的碎片方位角及方位角速度。

3 碎片运动状态解算

3.1 激光测距流程

将可见光相机解算得到的方位角信息输入位置-速度滤波器，即可得到目标方位角(α,β)与方位角速度$(\dot{\alpha},\dot{\beta})$。因激光测距仪机动到制定方位角测距存在延时，所以需要根据当前目标方位角与方位角速度预测激光测距仪延时后目标的方位角。记激光雷达从接收到测距指令到开始测距之间延时为 t_r，当前时刻目标方位角为(α_0,β_0)，方位角速度为$(\dot{\alpha}_0,\dot{\beta}_0)$，则应该给激光测距仪发送的测距指令为：

$$\begin{bmatrix}\alpha_t\\ \beta_t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha_0\\ \beta_0\end{bmatrix}+t_r\begin{bmatrix}\dot{\alpha}_0\\ \dot{\beta}_0\end{bmatrix} \tag{16}$$

3.2 扩展 Kalman 滤波

可见光相机和激光测距仪对目标测量获得的测量量并非轨道坐标系内位置矢量的线性表达式，因

此,线性 Kalman 滤波器无法满足滤波要求。所以,采用扩展 Kalman 滤波器进行滤波。非线性系统的系统方程与测量方程为:

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=f[x(t),t]+B(t)u(t)+G(t)w(t)\\ z(t)=h[x(t),t]+v(t)\end{cases} \tag{17}$$

式中:$w(t)$为白噪声。围绕最优状态估计线性化,得:

$$\begin{cases}\delta\dot{x}(t)=F(t)\delta x(t)+B(t)u(t)+G(t)w(t)\\ \delta z(t)=H(t)\delta x(t)+v(t)\end{cases} \tag{18}$$

其中,

$$\begin{cases}\delta x(t)=x(t)-\hat{x}(t)\\ \delta z(t)=z(t)-\hat{z}(t)\\ F(t)=\dfrac{\partial f[x(t),t]}{\partial x(t)}\Big|_{x(t)-\hat{x}(t)}\\ H(t)=\dfrac{\partial h[x(t),t]}{\partial x(t)}\Big|_{x(t)-\hat{x}(t)}\end{cases} \tag{19}$$

将公式(18)离散化,得:

$$\begin{cases}\delta x_{k+1}=\Phi_{k+1/k}\delta x_k+u_k+w_k\\ \delta z_{k+1}=H_{k+1}\delta x_{k+1}+v_k\end{cases} \tag{20}$$

对公式(20)使用卡尔曼滤波基本方程,并通过推导可得扩展卡尔曼滤波的方程为:

$$\begin{cases}\hat{X}_{k+1/k}=\Phi_{k+1/k}\hat{X}_k\\ \hat{X}_{k+1}=\hat{X}_{k+1/k}+K_{k+1}[Z_{k+1}-H_{k+1}(\hat{X}_{k+1/k}+u_k)]\\ K_{k+1}=P_{k+1/k}H_{k+1}^{\mathrm{T}}[H_{k+1}P_{k+1/k}H_{k+1}^{\mathrm{T}}+R_k]^{-1}\\ P_{k+1/k}=\Phi_{k+1/k}P_k\Phi_{k+1/k}^{\mathrm{T}}+Q_k\\ P_{k+1}=[I-K_{k+1}H_{k+1}]P_{k+1/k}[I-K_{k+1}H_{k+1}]^{\mathrm{T}}+K_{k+1}R_{k+1}K_{k+1}^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{21}$$

式中:Z_{k+1} 为测量量,此处为方位角 α、β 与碎片与航天器相对距离 r。

3.3 目标滤波定位模型

记碎片在航天器轨道坐标系中的相对运动状态为:

$$X=[r,v]^{\mathrm{T}}=[x,y,z,\dot{x},\dot{y},\dot{z}]^{\mathrm{T}} \tag{22}$$

描述目标相对运动的线性 C-W 方程为:

$$\dot{X}=AX+BU+w \tag{23}$$

式中:$U=[a_{cx},a_{cy},a_{cz}]^{\mathrm{T}}$ 为控制力产生的相对运动加速度,对于空间碎片而言,$U=0$;$w=[0,0,0,a_{dx},a_{dy},a_{dz}]^{\mathrm{T}}$,$[a_{dx},a_{dy},a_{dz}]^{\mathrm{T}}$ 为轨道扰动产生的空间碎片相对运动加速度。假设碎片短时间内不受轨道摄动力影响,对公式(23)进行离散化处理,得离散化相对动力学方程为:

$$X_k=\Phi_{k,k-1}X_{k-1} \tag{24}$$

记离散化时间为 t,航天器绕地球转动角速度为 ω,$\theta=\omega t$,$S=\sin\theta$,$C=\cos\theta$ 得:

$$\Phi_{k/k-1}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 6(\theta-S) & \dfrac{4S-3\theta}{\omega} & 0 & \dfrac{2}{\omega}(1-C)\\ 0 & C & 0 & 0 & \dfrac{S}{\omega} & 0\\ 0 & 0 & 4-3C & \dfrac{2}{\omega}(C-1) & 0 & \dfrac{S}{\omega}\\ 0 & 0 & 6\omega(1-C) & 4C-3 & 0 & 2S\\ 0 & -\omega S & 0 & 0 & C & 0\\ 0 & 0 & 3\omega S & -2S & 0 & C\end{bmatrix} \tag{25}$$

3.4 目标测量方程

将目标测角与测距信息进行组合,得出目标测量方程:

$$\begin{cases}z_{\mathrm{angle}}=h_{\mathrm{angle}}(R_p)+v_{\mathrm{angle}}\\ R_{\mathrm{dis}}=h_{\mathrm{dis}}(R_p)+v_r\end{cases} \tag{26}$$

令 $z_k=[z_{\mathrm{angle}}(k),R_{\mathrm{dis}}(k)]^{\mathrm{T}}$,$X_k=[R_p(k),V_p(k)]^{\mathrm{T}}$,$h(\cdot)=[h_{\mathrm{angle}}(\cdot),h_{\mathrm{dis}}(\cdot)]^{\mathrm{T}}$,$v_k=[v_{\mathrm{angle}}(k),v_r(k)]^{\mathrm{T}}$,则公式(26)可表示为:

$$z_k=h(X_k)+v_k \tag{27}$$

式中:H_k 为 $h(\cdot)$在状态 X 下的雅可比矩阵:

$$H_k=\frac{\partial h(X_k,k)}{\partial X}\Big|_{X_k=\hat{X}_k} \tag{28}$$

4 联合定位数值仿真

为验证可见光相机与激光测距仪联合探测定位方法的可行性,进行数值仿真验证。

假设航天器运行在 GEO 轨道,轨道偏心率 e=0.000°。可见光相机的部分参数如表 1 所示。

表 1 可见光相机参数

Tab.1 Camera parameters

Resolution	Field of view	Exposure time	Interval time
1 024×1 024	10°×10°	0.02 s	0.02 s

激光测距仪部分参数如表 2 所示。

表 2 激光测距仪参数

Tab.2 Parameters of laser range finder

Beam angle	Ranging precision	Time-delay
0.5°×0.5°	0.1 m(3σ)	0.03 s

仿真计算机基本配置信息如表 3 所示。

表 3 仿真计算机信息

Tab.3 Parameters of computer

CPU	RAM	OS	Language
Intel(R) Core (TM) i5-4590 CPU@3.3 GHz	4.00 GB	Ubuntu 14.04	C++

碎片初始运动状态如表 4 所示，x、y、z、r 单位为 m，$\dot{x}$、$\dot{y}$、$\dot{z}$ 单位为 m/s。

表 4 碎片初始运动状态

Tab.4 Initial relative motion state of debris

No	x	y	z	$\dot{x}$	$\dot{y}$	$\dot{z}$	r
1	9 000	600	−500	−100	−600	400	0.1
2	8 000	−600	500	100	300	−400	0.1
3	6 000	300	400	−80	−100	−150	0.08
4	10 000	600	700	−60	−10	−100	0.1

在上述仿真初始条件下，进行数值仿真，因碎片速度较快，仿真时长 t=1 s，仿真结果如图 6 所示。

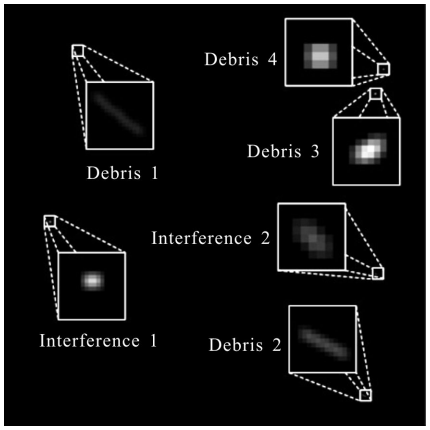


图 6 模拟图像

Fig.6 Simulative image

图 6 为第一帧模拟图像，任意加入两个虚假目标，对图像匹配过程进行干扰。由于干扰目标位置的随机性，在下一帧图像中，干扰目标可能出现在图像中任意位置。根据 1.4 节制定帧间匹配准则，经仿真验证，在匹配准则约束下，干扰目标无法通过匹配，因此在下一帧图像中，干扰目标将被排除。经帧间匹配，根据公式(9)解算得碎片方位角。方位角的解算如下所示。

仿真结果表明，用具有相等二阶中心矩的椭圆近似描述碎片轨迹，并以此制定帧间匹配条件，能够有效完成碎片的帧间匹配，剔除虚假目标。图 7~图 9 曲线表明，经位置-速度滤波，碎片方位角精度提高到 10^{-3} 度的量级，滤波方法效果显著。

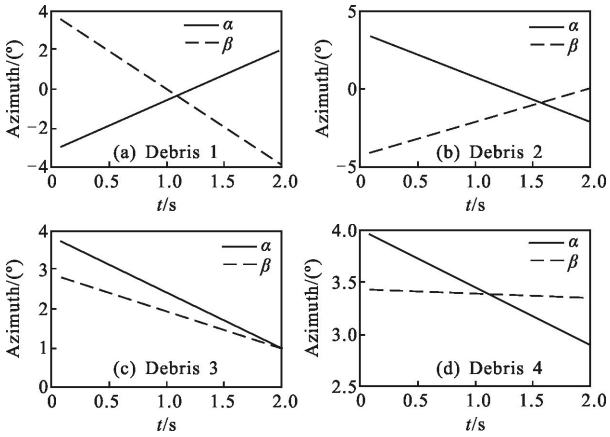


图 7 碎片真实方位角

Fig.7 True azimuth of space debris

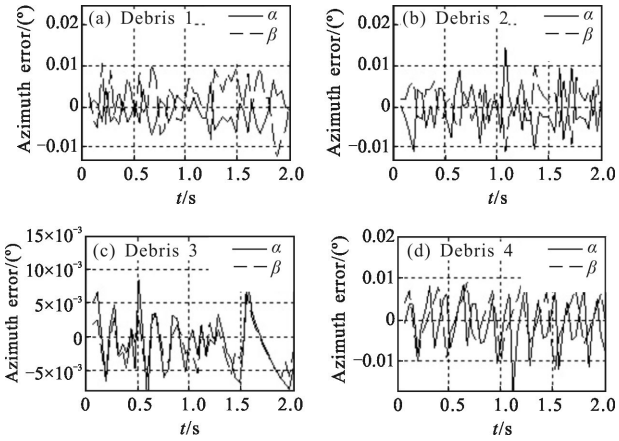


图 8 相机输出方位角误差

Fig.8 Azimuth errors of camera measurement

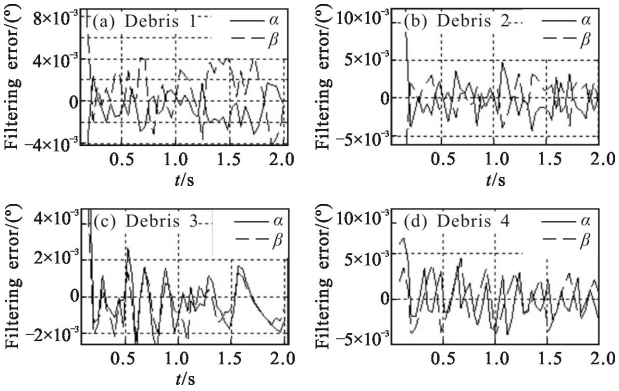


图 9 方位角滤波误差

Fig.9 Filtering errors of azimuth

对表 4 所示碎片 4 进行激光测距,并解算碎片的位置、速度信息,如图 10 所示。

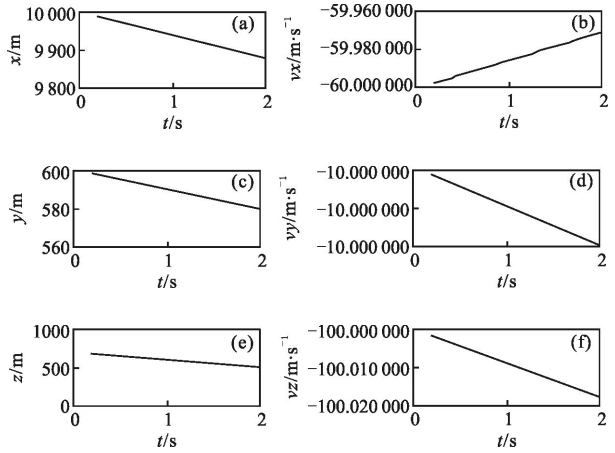


图 10 碎片真实位置、速度

Fig.10 True position and velocity of space debris

图 11 为根据相机测角数据与激光测距数据直接解算所得的碎片位置、速度误差曲线,图 12 为经扩展 Kalman 滤波后,碎片的位置、速度误差曲线。仿真结果表明,经扩展 Kamlam 滤波,碎片三维位置定位精度由滤波前的 2 m 量级提高到 1 m 的量级,速度定位精度由滤波前的 50 m/s 量级提高到 1 m/s 量级。同时,仿真结果表明,经位置速度滤波后得到的方位角、角速度能有效引导激光测距仪完成测距。

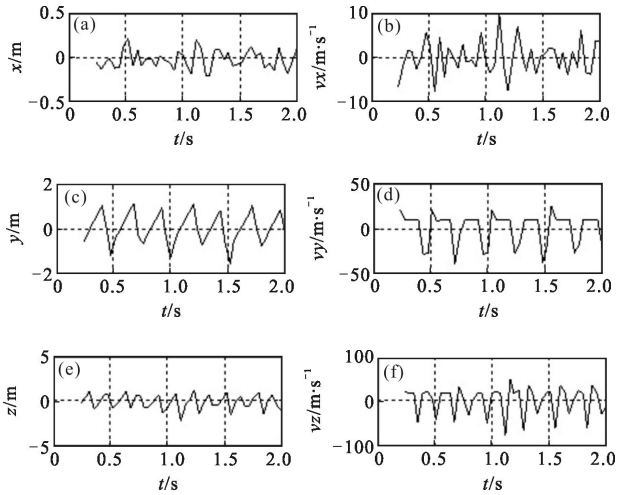
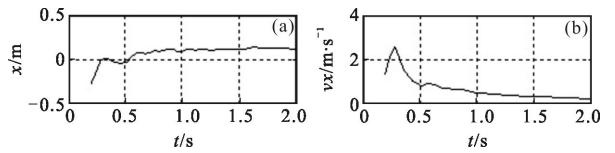


图 11 滤波前碎片位置、速度误差

Fig.11 Position and velocity errors of debris before filtering



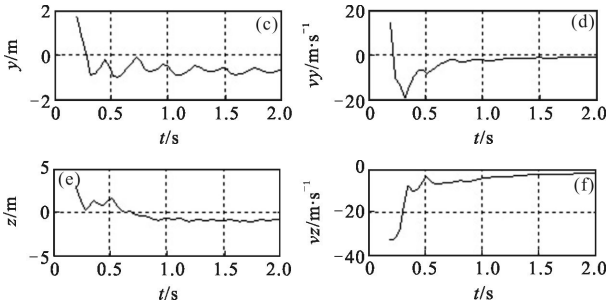


图 12 扩展 Kalman 滤波后位置、速度误差

Fig.12 Position and velocity errors of debris after extended Kalman filtering

为验证联合定位方法的实时性, 通过表 3 所示计算机完成上述仿真,仿真次数为 5 次,每次程序运行时间如表 5 所示。

表 5 仿真时间

Tab.5 Simulation time

	1	2	3	4	5	Mean time
Time/s	1.364	1.023	1.439	1.147	1.272	1.249

经仿真验证,2 s 内相机将拍摄 50 帧图像,通过这些图像完成联合定位平均耗时 1.249 s, 低于 2 s, 实时性较好。

5 结 论

针对小尺寸空间碎片, 文中采用可见光相机与激光测距仪相结合的方式对空间碎片进行在轨识探测与识别。为实现碎片成像轨迹的帧间匹配,采用与轨迹边缘具有等价二阶中心矩的椭圆对其进行描述。根据椭圆长半轴、偏心率、与横轴夹角、面积 4 个特征, 制定碎片帧间匹配准则, 用于多个碎片的匹配,以及虚假目标的剔除。对于满足帧间匹配准则的轨迹,判定为同一碎片,并计算出碎片方位角信息。经仿真验证,该方法能有效剔除虚假目标,匹配成功率高。

根据可见光相机的测角信息,采用位置-速度滤波算法获得更高精度的方位角、方位角速度信息,以此为指令驱动激光测距仪完成测距。之后结合测角与测距信息,采用扩展 Kalman 滤波获得较高精度的目标位置速度信息。经数值仿真验证,该方法能有效提高目标定位精度, 同时, 该方法具有较好的实时

性,能满足在轨实时探测的需求。

参考文献:

[1] Bai Xianzong. Research on orbital prediction error and collision probability of space objects[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
白显宗. 空间目标轨道预报误差与碰撞概率问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

[2] NASA. International space station performs fourth and fifth debris avoidance maneuvers of 2014 [N/OL]. Orbital Debris Quarterly News, 2015, 19 (1): 1-2. http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNv19i1.pdf.

[3] Letizia F, Colombo C, Lewis H G. Analytical model for the propagation of small-debris-object clouds after fragmentations [J]. ***Journal of Guidance, Control, and Dynamics***, 2015, 38(8): 1478-1491.

[4] Jin Yuzhu. Research on optical detection and recognition method of space de-bris [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
金玉竹. 空间碎片光学探测与识别方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[5] Hao Yingming, Zhu Feng, Ou Jinjun. 3D visual methods for object pose measurement [J]. ***Journal of Image and Graphics***, 2002, 12: 26-30. (in Chinese)
郝颖明, 朱枫, 欧锦军. 目标位姿测量中的三维视觉方法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 12: 26-30.

[6] Cai Han. Experiment research of non-cooperative space target relative measurement based on binocular vision [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
蔡晗. 基于双目视觉的非合作目标相对测量实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

[7] Pan Haibin, Cong Mingyu, Zhang Wei, et al. Imaging model study of space objects from space remote sensor [J]. ***Journal of Harbin Institute of Technology***, 2008, 40 (11): 1699-1702. (in Chinese)
潘海斌, 丛明煜, 张伟, 等. 航天遥感器的空间目标成像模型研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1699-1702.

[8] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. ***Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on***, 1986, 8(6): 679-698.

[9] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. ***IRE Transactions on Information Theory***, 1962, 8(2): 179-187.

[10] Sun Bei. Research on image recognition based on moment features [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese)
孙贝. 基于矩特征提取的图像识别算法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.

[11] Hu Haitao, Ping Ziliang, Wu Bin. Quick algorithm of image moments with rotational invariance [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2010, 30(2): 394-398. (in Chinese)
胡海涛, 平子良, 吴斌. 具有旋转不变性的图像矩的快速算法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 394-398.

[12] Zhai Guang, Zhang Jingrui. Research on rapid attitude tracking for space non-cooperative target [J]. ***Journal of Astronautics***, 2013, 34(3): 362-368. (in Chinese)
翟光, 张景瑞. 空间非合作目标快速姿态跟踪导航方法研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(3): 362-368.