基于双目光学图像信息的空间非合作目标自主相对导航方法

王大轶, 张磊*, 朱卫红, 史纪鑫, 黄美丽, 邹元杰

北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

*联系人, E-mail: zhanglei_isse@126.com

收稿日期: 2018-08-22; 接受日期: 2018-10-24; 网络出版日期: 2018-12-29

国家自然科学基金(编号: 61525301, 61690215, 61803027)资助项目

摘要 针对无任何先验信息的空间非合作目标相对导航问题, 提出了一种仅基于双目视觉图像测量的自主相对导航方法. 首先, 建立了非合作目标双目图像测量辨识模型及特征位置矢量解算方法. 利用观测卫星相机系下的目标相对位置矢量观测序列, 结合卫星姿态、相机安装方位等信息, 给出了非合作目标初始相对运动状态估计及导航滤波参数初始化方法. 之后采用考虑状态噪声补偿以及观测方差矩阵和状态噪声矩阵自适应修正的扩展卡尔曼滤波算法, 完成空间非合作目标自主相对导航解算. 最后以低轨非合作目标逼近段为例进行相对导航仿真, 验证了该方法的有效性.

关键词 非合作目标, 双目视觉, 自主相对导航

PACS: 95.10.Eg, 95.40.+s, 42.30.-d

1 引言

相对导航作为航天器在轨服务的核心技术之一, 在交会对接、在轨燃料加注、失效航天器捕获等任务中发挥着至关重要的应用. 对于合作航天器, 由于目标外形特征已知, 且星上通常配备有GPS接收机、交会敏感器等测量设备, 因此合作目标的相对导航技术发展已较为成熟, 目前包括美国的DART自主交会验证试验和我国的空间站计划等均已实现了合作目标的自主相对导航. 然而, 对于空间非合作航天器, 由于目标本身无标识、无应答、外形尺寸未知等特点, 使得传

统的合作目标相对导航手段难以适用. 此外, 考虑到非合作目标辨识测量过程的复杂性, 在相对导航解算时可能会出现观测信息不完备或数据间断等情况, 因此, 解决测量手段严重受限条件下的非合作目标相对导航问题, 建立一种具有良好适应性的自主相对导航方法, 对提升航天器在轨服务能力具有重要意义.

近年来, 国内外学者针对非合作目标相对导航问题开展了大量研究. Woods和Christian^[1]以低轨非合作目标交会任务为例, 研究了基于激光成像雷达获取非合作目标可视部位三维点云数据的相对导航方法. 利用光学相机与激光测距仪的组合, 美国轨道快车卫星

引用格式: 王大轶, 张磊, 朱卫红, 等. 基于双目光学图像信息的空间非合作目标自主相对导航方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 024509
Wang D Y, Zhang L, Zhu W H, et al. Autonomous relative navigation for noncooperative target using stereo vision measurements (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 024509, doi: [10.1360/SSPMA2018-00294](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00294)

配备的ARCSS系统成功实现了自主交会任务过程的相对导航, 该系统同样能够满足非合作目标接近段的相对导航需求^[2]. 仅依靠光学相机的相对导航系统具有成本低、设备简单、隐蔽性强等方面的优势, 是近年来非合作目标相对导航的研究热点. 瑞典的PRISMA项目和德国的AVANTI项目均对仅依靠光学相机的非合作目标相对导航技术进行了在轨试验, 证明了以光学相机为测量敏感器, 实现对空间非合作目标自主交会的可行性^[3,4]. 针对单个相机无法直接获得目标相对距离信息的问题, Woffinden和Geller^[5,6]提出了改善仅测角相对导航可观测性的最优轨道机动策略, 不过该方法会增加卫星在轨运行的燃料消耗, 且导航误差和控制误差也会让轨道机动的效果难以达到预期. 针对上述问题, Geller等人^[7]提出将相机偏心安装并旋转的观测策略, 尤岳等人^[8]进一步证明了径向和法向相机安装偏心可以改善近距离 $\mathbf{v}$ -bar相对位置保持点的可观测度, 仿真结果证明了该方法的可行性.

相比于单个相机系统, 双目相机利用三角视差测量原理可以直接实现空间三维信息的恢复, 不仅具有更好的导航可观测性, 而且双目图像测量数据本身可以相互备份, 从而进一步提高导航测量系统的可靠性. 本文针对空间非合作目标逼近过程的相对导航问题, 仅基于双目光学图像测量数据, 从目标搜索、发现、辨识、导航解算四个环节, 完成星上自主相对导航算法设计. 该方法不需要预先获取目标形状、初始状态等先验信息, 且能够自适应处理目标测量数据中断、噪声矩阵修正等问题. 最终通过低轨非合作目标逼近过程的相对导航仿真验证了该方法在原理和技术上的可行性.

2 双目立体视觉测量原理

双目立体视觉是利用两个相机从不同角度同时获取目标的两幅数字图像, 基于三角视差原理恢复出目标三维位置信息的方法, 其基本测量原理如图1所示. 图中 $o_l-x_l y_l z_l$, $o_r-x_r y_r z_r$ 分别表示左、右相机坐标系, $O_l-X_l Y_l$, $O_r-X_r Y_r$ 分别表示左、右像平面坐标系. 为简化问题, 本文假设两相机平行安装且具有相同的内参, 即视场角均为 α , 相机焦距均为 f . 设双目相机基线长度为 b , 则由左相机系到右相机系的坐标变换可以

图1 双目视觉测量原理

Figure 1 Schematic diagram of stereo vision measurement.

写为 $\mathbf{r}_r = \mathbf{r}_l - [b, 0, 0]^T$.

设目标T在左右像平面中的位置分别为 (u_l, v_l) , (u_r, v_r) , 根据三角测量原理, 由目标左右像平面坐标可以算得相机坐标系下目标的位置. 这里选取左相机系为导航测量的主坐标系, 则目标在该坐标系下的位置可以写为^[9]

$$\begin{cases} x_l = z_l \frac{u_l}{f}, \\ y_l = z_l \frac{v_l}{f}, \\ z_l = \frac{fb}{u_l - u_r}. \end{cases} \quad (1)$$

记像平面坐标系下 X , Y 方向上的图像分辨率分别为 ε_u , ε_v , 则相机系下三个方向的位置测量精度满足

$$\begin{cases} \varepsilon_x = z_l \frac{\varepsilon_u}{f}, \\ \varepsilon_y = z_l \frac{\varepsilon_v}{f}, \\ \varepsilon_z = z_l^2 \frac{\varepsilon_u}{fb}. \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式可知, 双目视觉相机的测量误差与目标视线距离 z 相关, 其中垂直视线方向上的测量误差与 z 成正比, 视线方向上的测量误差与 z^2 成正比.

3 图像处理及目标辨识

图像处理及目标辨识首先对双目立体相机拍摄的

图像进行处理, 进一步从图像中辨识非合作目标, 最后通过左右目图像辨识结果, 三维重构解算非合作目标的空间位置信息. 图像处理及目标辨识流程如图2所示.

3.1 图像处理

采用最大类间方差法进行图像二值化分割, 以目标与背景类间方差最大或类内方差最小为阈值选取准则. 按图像的灰度特性, 将图像分成背景和目标两部分. 背景和目标之间的类间方差越大, 说明构成图像的两部分的差别越大, 当部分目标错分为背景或部分背景错分为目标都会导致两部分差别变小. 因此, 使类间方差最大的分割意味着错分概率最小.

设分割阈值为 k , 背景像素点数占全部像素点比例为 ω_0 , 目标像素点所占比例为 ω_1 ; 背景部分的平均像素值为 u_0 , 目标部分的平均像素值为 u_1 . 对于任意像素值 i , 设其在图像中比例为 p_i , 图像平均像素值为 u_T , 则图像各点像素方差和为

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=0}^{255} (i - u_T)^2 p_i = \sigma_W^2 + \sigma_B^2, \quad (3)$$

$$\sigma_B^2 = \omega_0(u_0 - u_T)^2 + \omega_1(u_1 - u_T)^2 = \omega_0\omega_1(u_1 - u_0)^2, \quad (4)$$

图2 (网络版彩图)图像处理及目标辨识流程

Figure 2 (Color online) Image processing and target identification process.

$$\sigma_W^2 = \sum_{i=0}^k (i - u_0)^2 p_i + \sum_{i=k+1}^{255} (i - u_1)^2 p_i, \quad (5)$$

其中 σ_B^2 即为类间方差, σ_W^2 即为类内方差. 当类间方差最大或类内方差最小时取的像素值即为最优阈值.

3.2 图像目标辨识

目标辨识主要从二值化图像中提取目标, 获得目标轮廓, 并计算目标中心点在图像中的位置. 本文提出一种改进连通域方法, 实现图像目标的辨识提取. 提取算法包括如下三部分.

(1) 行连通域提取

对图像进行逐行扫描, 假设对第 i 行扫描, 确定连续像素的起始列 q_1 、终止列 q_2 , 则记录相应的连续像素区域为 $[i, q_1, q_2, q_2 - q_1 + 1]$, 依次对每行遍历获取所有连通区域列表.

(2) 连通区域提取

1) 排序: 确定起始搜索行. 按照行连通域列表 $[i, q_1, q_2, q_2 - q_1 + 1]$ 中第四列数值大小对列表排序;

2) 上行修复: 依次按照排序后的行连通域向上侧展开搜索, 通过八邻域检测准则完成每行连通域修复直至上边界, 并更新行连通域列表;

3) 下行修复: 由步骤2)获取的列表依次由上边界向下修复直至连通区域下边界, 并更新行连通域列表.

(3) 连通区域中心提取

1) 统计连通域内所有像素数目;

2) 对连通域内所有像素, 将其行标志累加, 除以像素数目, 作为几何中心行位置;

3) 对连通域内所有像素, 将其列标志累加, 除以像素数目, 作为几何中心列位置.

3.3 匹配、筛选与重构

在目标空间位置重构之前, 首先对图像辨识的目标中心位置信息进行判别, 采用如下两条准则对目标进行匹配筛选.

(1) 列像素容差准则: 列像素容差准则的确定公式如下:

$$\Delta v \leq r_4 u_{1c} + (r_5 - 1) v_{1c} + f r_6 + \frac{f}{z} t_y, \quad (6)$$

其中, Δv 为双目相机获取目标中心的列像素差, (u_{1c}, v_{1c}) 为左相机图像中目标中心的像素坐标,

(r_4, r_5, r_6) 为右相机系 y 向单位矢量在左相机系下的坐标, t_y 为双目相机基线在 y 方向上的投影, f 为相机平均焦距, z 为目标空间深度.

(2) 目标距离判定准则: 由于目标在视场范围内, 其重构后的深度应当为正值, 因此其取值必定大于 0, 另外目标在相机中的深度远小于星空、地球大气等在相机中的深度, 因此应当约束目标距离在双目相机有效探测距离范围内, 排除其他可能因素的干扰. 综合考虑目标图像辨识能力及距离测量精度, 选取目标距离判定准则为 $z \leq 300 \text{ m}$.

对左右目排序后的区域几何中心依次进行匹配: 首先判断列像素容差准则是否满足, 然后采用第 2 节给出的方法对目标三维位置信息进行重构计算, 再通过距离判定准则进行二次筛查, 直到确定目标位置, 否则确定为未辨识出目标.

4 自主相对导航解算

4.1 动力学模型

针对近圆轨道非合作目标逼近过程, 在双目相机有效测距范围内, 可采用 C-W 方程描述目标的相对运动. 首先定义相对运动参考坐标系. 记观测卫星在地心惯性系下的位置、速度矢量为 $\mathbf{R}$, $\mathbf{V}$, 则可建立观测

卫星 VVLH 坐标系, 其原点定义在观测卫星质心, 坐标轴指向由下式确定

$$\mathbf{e}_z = -\frac{\mathbf{R}}{\|\mathbf{R}\|}, \mathbf{e}_y = -\frac{\mathbf{R} \times \mathbf{V}}{\|\mathbf{R} \times \mathbf{V}\|}, \mathbf{e}_x = \mathbf{e}_y \times \mathbf{e}_z. \quad (7)$$

则在观测卫星 VVLH 坐标系下, 目标的相对运动方程可以写为

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2n\dot{z} = 0, \\ \ddot{y} + n^2 y = 0, \\ \ddot{z} + 2n\dot{x} - 3n^2 z = 0, \end{cases} \quad (8)$$

其中, n 为观测卫星平运动角频率. 上式具有如下形式的解析解:

$$\begin{cases} x(t) = \left(\frac{4\dot{x}_0}{n} - 6z_0 \right) s - \frac{2\dot{z}_0 c}{n} + (6nz_0 - 3\dot{x}_0)t + x_0 + \frac{2\dot{z}_0}{n}, \\ y(t) = \frac{\dot{y}_0 s}{n} + y_0 c, \\ z(t) = \frac{\dot{z}_0 s}{n} + \left(\frac{2\dot{x}_0}{n} - 3z_0 \right) c + 4z_0 - \frac{2\dot{x}_0}{n}, \\ \dot{x}(t) = 2\dot{z}_0 s + (4\dot{x}_0 - 6nz_0)c + 6nz_0 - 3\dot{x}_0, \\ \dot{y}(t) = -ny_0 s + \dot{y}_0 c, \\ \dot{z}(t) = (3nz_0 - 2\dot{x}_0)s + \dot{z}_0 c, \end{cases} \quad (9)$$

其中, $s = \sin nt$, $c = \cos nt$. 相应地, 状态转移矩阵 $\Phi(t, 0)$ 可以写为

$$\Phi(t, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 6(s - nt) & 4s/n - 3t & 0 & -2(c - 1)/n \\ 0 & c & 0 & 0 & s/n & 0 \\ 0 & 0 & 4 - 3c & -2(1 - c)/n & 0 & s/n \\ 0 & 0 & -6n(c - 1) & 4c - 3 & 0 & 2s \\ 0 & -ns & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 3ns & -2s & 0 & c \end{bmatrix}. \quad (10)$$

4.2 测量模型

由观测时刻目标双目图像, 按照第 3 节中给出的图像处理流程可以获得左相机系下目标的相对位置矢量 $\mathbf{Y}_{\text{cam}}$. 由于相对导航滤波解算是在观测卫星 VVLH 坐标系下进行, 因此还需结合相机安装方位及卫星姿态将观测量转换至 VVLH 坐标系.

记观测卫星本体下左相机安装位置矢量为 $\mathbf{R}_{\text{cam}}$, 卫星本体相对 VVLH 坐标系的偏航、俯仰及

滚动角为 (ϕ, θ, φ) , 则观测卫星 VVLH 坐标系下目标相对位置观测量 $\mathbf{Y}_{\text{VVLH}}$ 可由下式得到:

$$\mathbf{Y}_{\text{VVLH}} = \mathbf{M}_{\text{BF2VVLH}}(\phi, \theta, \varphi) \cdot [\mathbf{M}_{\text{CAM2BF}} \cdot \mathbf{Y}_{\text{cam}} + \mathbf{R}_{\text{cam}}], \quad (11)$$

其中, $\mathbf{M}_{\text{CAM2BF}}$ 表示相机系到卫星本体系的旋转矩阵, 由相机安装方位确定, $\mathbf{M}_{\text{BF2VVLH}}(\phi, \theta, \varphi)$ 表示卫星本体系到 VVLH 坐标系的旋转矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{M}_{\text{BF2VVLH}}(\phi, \theta, \varphi) = [\mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\varphi) \mathbf{R}_z(\phi)]^T. \quad (12)$$

4.3 导航滤波算法

本文采用考虑状态噪声补偿与协方差自适应修正的扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)算法完成自主相对导航解算. 关于EKF算法的具体实现流程可参考相关文献^[10], 这里主要针对以下几个问题进行说明.

(1) 初始化

本文考虑无先验信息的空间非合作目标, 因此在进行相对导航解算时, 仅根据目标辨识及图像处理的结果, 在获得连续两帧以上目标相对位置观测量之后对目标初始状态矢量 $(\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0)$ 和协方差矩阵 $\mathbf{P}_0$ 进行初始化. 记相机系下目标连续两次观测量为 $(t_{01}, \mathbf{Y}_{\text{cam}}^{01})$, $(t_{02}, \mathbf{Y}_{\text{cam}}^{02})$, 则 $(\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0)$, $\mathbf{P}_0$ 初始化为

$$\begin{cases} t_0 = t_{02}, \\ \mathbf{r}_0 = \mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^{02}, \\ \mathbf{v}_0 = (\mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^{02} - \mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^{01}) / (t_{02} - t_{01}), \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{02} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{02}^T & 0 \\ 0 & \frac{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{02} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{02}^T}{(t_{02} - t_{01})^2} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中, $\mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^{01}$, $\mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^{02}$ 由 $\mathbf{Y}_{\text{cam}}^{01}$, $\mathbf{Y}_{\text{cam}}^{02}$ 代入(11)式计算, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{02} = \mathbf{M}_{\text{BF2VVLH}} \mathbf{M}_{\text{CAM2BF}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{02}(\mathbf{Y}_{\text{cam}}^{02})$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{02}(\mathbf{Y}_{\text{cam}}^{02})$ 由 $\mathbf{Y}_{\text{cam}}^{02}$ 代入(2)式计算.

(2) $\mathbf{R}_i$, $\mathbf{Q}_i$ 矩阵自适应修正

根据双目相机测量原理可知, 相对导航观测误差随目标距离而变化, 因此在每一步导航解算时, 均需对观测方差矩阵 $\mathbf{R}_i$ 进行修正, 即

$$\mathbf{R}_i = \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{VVLH}}^i \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{VVLH}}^{iT}, \quad (15)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{VVLH}}^i = \mathbf{M}_{\text{BF2VVLH}} \mathbf{M}_{\text{CAM2BF}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{cam}}^i(\mathbf{Y}_{\text{cam}}^i)$, $\mathbf{Y}_{\text{cam}}^i$ 为 t_i 时刻相机系下目标观测量. $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{cam}}^i(\mathbf{Y}_{\text{cam}}^i)$ 同样由 $\mathbf{Y}_{\text{cam}}^i$ 代入(2)式计算.

状态噪声矩阵 $\mathbf{Q}_i$ 初始化为对角矩阵

$$\mathbf{Q}_0 = \text{diag}[\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_{\dot{x}}^2, \sigma_{\dot{y}}^2, \sigma_{\dot{z}}^2]. \quad (16)$$

根据系统状态偏差与观测残差间的对应关系, 本文利用连续 N 次观测的均方残差, 对状态噪声矩阵 $\mathbf{Q}_i$

进行定期修正

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{K}_i \left[\frac{1}{N} \sum_{k=i-N+1}^i (\mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^k - \mathbf{r}_k)(\mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^k - \mathbf{r}_k)^T \right] \mathbf{K}_i^T, \quad (17)$$

其中, $\mathbf{K}_i$ 为卡尔曼增益矩阵, $\mathbf{Y}_{\text{VVLH}}^k$ 和 $\mathbf{r}_k$ 分别表示 t_k 时刻VVLH坐标系下目标相对位置观测值和预测值. 根据上述关系每隔 N 步对 $\mathbf{Q}_i$ 矩阵进行一次更新, 从而实现状态噪声矩阵的自适应修正.

(3) 观测数据中断

在执行每一步状态更新前, 算法首先检查当前是否有观测数据输入, 并判断观测数据是否存在异常(即目标距离是否超出双目相机测距范围), 当观测数据中断或存在异常时, 算法根据相对运动模型对当前状态仅进行时间更新, 不执行测量更新.

5 仿真结果

为验证本文提出的基于双目光学图像信息的自主相对导航方法的可行性, 下面以低轨非合作目标逼近过程为例进行相对导航仿真. 采用的双目相机参数如表1所示. 左相机在观测卫星本体体系下的安装位置矢量 $\mathbf{R}_{\text{cam}} = [3.174, -0.35, 0] \text{ m}$, 由相机系到卫星本体系的旋转矩阵 $\mathbf{M}_{\text{CAM2BF}} = \mathbf{R}_x(-90^\circ) \mathbf{R}_y(-90^\circ) \mathbf{R}_x(-15^\circ)$. 表2给出了观测卫星与非合作目标的初始轨道参数.

根据卫星初始轨道参数, 首先在高精度动力学模型下生成观测卫星和非合作目标参考轨道, 该轨道将作为仿真场景的输入, 生成目标观测图像数据. 图3给出了四个不同时刻观测仿真场景图像.

在目标逼近过程中, 观测卫星对目标进行实时搜索. 上述四个时刻目标双目图像辨识结果如图4所示. 可以看出, 第一个时刻目标不可见, 从第二个时刻起, 目标逐渐进入视场, 识别算法准确辨识出目标.

利用图像辨识及空间位置重构算法, 可以获得目标在左目相机坐标系下的相对位置, 该结果相对真实值的测量误差变化如图5所示. 可以看出, 深度方向上的识别误差明显大于相机焦平面内的误差分量, 且识别误差随目标距离减小逐渐趋于收敛. 另外, 从图中还可看出, 目标辨识存在数据间断的情况, 表明目标图像辨识受到了光照和星光背景等因素的干扰.

利用仿真生成的双目视觉测量数据, 按照前文给

表 1 双目相机参数**Table 1** Stereo camera parameters

相机参数	值
焦距 (mm)	16
基线长度 (m)	0.7
像元尺寸 (μm)	5.5
视场角 ($^\circ$)	37.84
图像采样频率 (Hz)	1

表 2 J2000系下卫星初始轨道参数**Table 2** Satellite initial orbit parameters in the J2000 frame

初始状态	值
初始时刻	2018-08-13 02:51:40.000 UTC
观测卫星位置 (km)	[2143.739, -2739.837, 5743.175]
观测卫星速度 (km s^{-1})	[2.329, -6.252, 3.837]
非合作目标位置 (km)	[2139.737, -2729.632, 5748.125]
非合作目标速度 (km s^{-1})	[2.333, -6.257, -3.827]

图 3 (网络版彩图)不同时刻仿真场景图像. (a) 2018/08/13 03:32:52; (b) 2018/08/13 03:58:52; (c) 2018/08/13 04:01:39; (d) 2018/08/13 04:03:40**Figure 3** (Color online) Simulation images at different epochs. (a) 2018/08/13 03:32:52; (b) 2018/08/13 03:58:52; (c) 2018/08/13 04:01:39; (d) 2018/08/13 04:03:40.

出的算法流程, 进行相对导航仿真, 所得目标位置、速度导航误差随时间变化情况如图6所示.

图中黑色实线表示观测卫星VVLH坐标系下目标相对位置、速度导航误差, 红色虚线表示 3σ 误差线. 仿真弧段内目标相对观测卫星的距离由280 m减小至15 m. 由图中可以看出, 相对导航位置、速度误差均随目标逼近而逐渐减小, 当目标与观测卫星距离小于200 m时, 导航位置误差减小至5 m以下, 速度误差减

图 4 (网络版彩图)双目辨识结果**Figure 4** (Color online) Stereo vision identification results.

小至0.07 m/s以下, 当目标运行至距离观测卫星15 m时, 导航位置误差减小至0.33 m, 速度误差减小至0.02 m/s. 整个逼近过程导航位置均方根误差为3.85 m, 速度均方根误差为0.23 m/s. 上述结果验证了基于双目光学图像的非合作目标自主相对导航方法的可行性, 在观测数据出现间断的条件下算法依然能够保持较快收敛.

图 5 (网络版彩图)识别结果与真实值的绝对误差(图中1表示辨识出目标, 0表示未辨识出目标)

Figure 5 (Color online) Absolute error between the identification result and true value.

6 结论

本文针对空间非合作目标逼近过程的相对导航问题, 给出了一种仅基于双目视觉图像测量信息的自主相对导航方法. 该方法在不依赖于目标几何外形、初

图 6 (网络版彩图)相对导航位置、速度误差

Figure 6 (Color online) Relative navigation errors for position and velocity components.

始状态等任何先验信息的条件下, 仅依靠双目光学图像测量, 即可完成目标辨识与几何中心提取, 从而得到目标在观测卫星相机系下的相对位置矢量. 基于目标双目光学图像观测序列, 结合卫星姿态、相机安装方位等信息, 本文给出了非合作目标初始运动状态估计方法及相对导航观测方差矩阵和状态噪声矩阵自适应修正算法, 以完成非合作目标自主相对导航解算. 仿真结果表明, 本文提出的方法可以实现百米内米级、五十米内亚米级的自主相对导航精度, 能够满足空间非合作目标在轨服务的应用需求.

参考文献

- 1 Woods J O, Christian J A. LIDAR-based relative navigation with respect to non-cooperative objects. *Acta Astron*, 2016, 126: 298–311
- 2 Leinz M R, Chen C T, Beaven M W, et al. Orbital Express Autonomous Rendezvous and Capture Sensor System (ARCSS) flight test results. In: *Proceedings of SPIE, Sensors and Systems for Space Applications II*. Orlando, 2008. 19–23
- 3 Bodin P, Larsson R, Nilsson F, et al. PRISMA: An in-orbit test bed for guidance, navigation, and control experiments. *J Spacecraft Rockets*, 2009, 46: 615–623
- 4 Ardaens J S, Gaias G. Spaceborne autonomous vision-based navigation system for AVANTI. In: *Proceedings of 65th International Astronautical Congress*. Toronto, 2014
- 5 Woffinden D C, Geller D K. Observability criteria for angles-only navigation. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2009, 45: 1194–1208
- 6 Woffinden D C, Geller D K. Optimal orbital rendezvous maneuvering for angles-only navigation. *J Guidance Control Dyn*, 2009, 32: 1382–1387
- 7 Geller D K, Perez A. Initial relative orbit determination for close-in proximity operations. *J Guidance Control Dyn*, 2015, 38: 1833–1842
- 8 You Y, Wang H, Christophe P, et al. Square root unscented Kalman filter-based angles-only relative navigation using camera offset (in Chinese). *J Astronaut*, 2016, 37: 1312–1322 [尤岳, 王华, Christophe Paccolat, 等. 基于SRUKF的偏心仅测角相对导航方法. 宇航学报, 2016, 37: 1312–1322]
- 9 Xu C, Wang D Y, Huang X Y. Relative navigation for planetary landing using stereo vision measurements (in Chinese). *J Astron*, 2016, 37: 802–810 [徐超, 王大轶, 黄翔宇. 采用双目视觉测量的行星着陆相对导航方法. 宇航学报, 2016, 37: 802–810]

- 10 Wang D Y, Li M D, Huang X Y, et al. Autonomous Navigation Technology Based on Multi-Source Information Fusion (in Chinese). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018 [王大轶, 李茂登, 黄翔宇, 等. 航天器多源信息融合自主导航技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2018]

Autonomous relative navigation for noncooperative target using stereo vision measurements

WANG DaYi, ZHANG Lei^{*}, ZHU WeiHong, SHI JiXin, HUANG MeiLi & ZOU YuanJie

Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

An autonomous relative navigation method based on stereo vision measurements is proposed for noncooperative targets without any prior information. Firstly, a target identification model using only stereo vision measurements is established. Based on the relative position vector computed from the stereo image sequence, the initial state vector of the noncooperative target and navigation filter covariance matrix are initialized by taken spacecraft attitude and camera installation information into account. Then, an extended Kalman filter considering state noise compensation as well as observation variance matrix and state noise matrix adaptive correction is formulated to solve the noncooperative relative navigation problem. Finally, a low Earth orbit, noncooperative target approaching navigation scenario is considered. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method for noncooperative autonomous relative navigation.

noncooperative target, stereo vision, autonomous relative navigation

PACS: 95.10.Eg, 95.40.+s, 42.30.-d

doi: [10.1360/SSPMA2018-00294](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00294)