

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0071- 05

空间非合作目标贴近扫描观测的制导方法研究*

任仙海, 杨乐平, 朱彦伟

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:随着微小卫星技术的不断发展, 对目标航天器的近距离观测已成为一类新的航天任务, 在空间态势感知、在轨服务等方面具有重要作用和广泛应用前景。针对大型空间非合作目标的近距离扫描观测问题, 提出了一种基于改进的人工势场法的制导方法, 设计了平行于目标区域表面的引力场函数和垂直于目标区域表面的斥力场函数, 由引力场来提供前进的加速度, 并满足成像拖影量的约束, 由斥力场来处理分辨率和碰撞避免约束。所得到的观测航天器轨迹能够很好地跟随目标区域形状, 实现对空间非合作目标区域连续稳定的扫描观测, 且所需要的速度增量不大, 计算量较小, 便于星上执行。

关键词:制导控制; 近距离观测; 相对运动; 微小卫星

中图分类号: V448. 2 文献标识码: A

A New Method of Guidance for Proximity Scanning Inspection of Non-cooperative Space Target

REN Xian-hai, YANG Le-ping, ZHU Yan-wei

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With the development and application of micro-satellites, proximity inspection of spacecraft has become a new area of space mission. It plays an important role in Space Situational Awareness and on-orbit servicing, ensuring broad application prospects. The current study developed a new method of guidance for proximity scanning inspection of non-cooperative space targets based on the modified artificial potential field method. First, the attractive potential function and repulsion potential function were formulated. The former, parallel to the surface of the target, guides the inspector from the initial position to the goal position. The latter, perpendicular to the surface of the target, is used to deal with the constraint conditions like image resolution, minimum angle of observation and collision avoidance constraint etc. Simulation results demonstrate that the inspector can follow the surface of the target well and conduct a coherent and stable scanning inspection. Furthermore, it requires less computational effort and is easier to realize on the inspector.

Key words: guidance control; proximity inspection; relative motion; micro-satellite

随着微小卫星技术的不断发展, 对目标航天器的近距离观测已成为一类新的航天任务, 在空间态势感知、在轨服务等方面具有重要作用和广泛应用前景。美国有多项相关研究计划已经或正在实施, 如 ANGELS 计划、XSS 计划、Mini AERCAM 纳星计划等, 有力地促进了相关技术的发展^[1-3]。

航天器贴近扫描观测是指: 由于观测的目标区域超出观测相机视场范围, 观测航天器需通过持续变换位置来跟踪需要观测的目标区域, 从而完整了解和掌握所需要目标区域信息, 如航天飞机隔热瓦的完好性检测。对于空间非合作目标, 由于三维特性未知, 观测航天器需要近实时地获取相对目标区域的导航信息, 并在线产生制导控制指令。已有的制导方法多数是针对目标三维构形已知的情况, 包括 Laplace 势场法^[4]、GVG 法^[5]等, 且 Laplace 势场法和 GVG 法的计算量大, 不利于星上执行。传统的 APF 法^[6-8] (Artificial Potential Field, APF), APF/LQR 法^[1] 虽然可以实时地处理环境中的碰撞避免问题, 但较难处理观测设备性能和任务目标对观测轨迹的约束, 且传统 APF 法容易产生死锁现象^[1]。本文针对复杂构形航天器近距离扫描观测问题, 提出一种基于改进的人工势场法的制导方法, 设计了平行于目标区域

* 收稿日期: 2010- 05- 15

基金项目: 国家 863 基金资助项目 (2009AA7090015)

作者简介: 任仙海 (1981-), 男, 博士生。

表面的引力场函数和垂直于目标区域表面的斥力场函数,由引力场来提供前进的切向加速度,并满足成像拖影量约束,由斥力场来处理分辨率和碰撞避免约束,文中给出了仿真验证结果。

1 扫描观测模型

对未知三维构形的大型复杂构形航天器进行观测,为了尽可能提高图像分辨率,避免相互遮挡,需要在保持安全距离的前提下,贴近目标区域进行观测。观测过程中相机始终垂直指向目标区域(略微朝飞行方向倾斜),随着观测航天器的移动,相机对目标区域进行持续地扫描观测。观测轨迹的约束主要包括碰撞避免约束、图像分辨率约束、拖影量约束和最小观测角约束等,各种约束条件构成一个贴近目标区域的观测空间,如图1、图2所示。最大观测距离约束构成观测空间的外边缘,碰撞避免约束构成观测空间的内边缘,最小观测角约束构成观测空间的左右边缘,整个观测空间呈扇形环状结构。若观测航天器接近到观测空间边缘(即进入缓冲区),则施加控制加速度,以维持观测航天器始终处于观测空间之中。缓冲区的大小取决于观测航天器的当前速度和所能提供的最大加速度。观测航天器的动力学模型采用C-W方程^[9]。

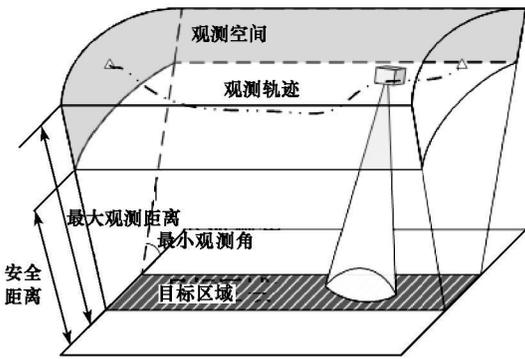


图1 观测空间

Fig. 1 Observation space

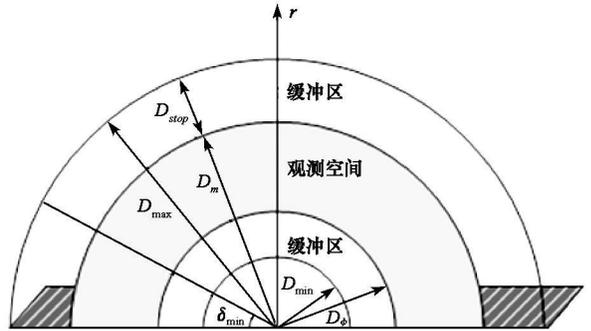


图2 观测空间剖面

Fig. 2 Observation space profile

(1) 图像分辨率约束

观测距离和图像分辨率之间的关系表示为^[10]

$$\text{Res} = r_{co} \tan\left(\frac{\theta_{av}}{N}\right) \approx r_{co} \theta_{av} / N \quad (1)$$

式中 r_{co} 为观测距离, θ_{av} 为相机视场角, N 为像素数。

因此,图像分辨率对观测距离的约束表示为

$$r_{co} \leq \text{Res} \cdot N / \theta_{av} \quad (2)$$

(2) 拖影量约束

相对运动速度和拖影量之间的关系表示为^[10]

$$n = \arctan\left[\frac{v_{co} t_{exp}}{r_{co}}\right] / \theta_{pixel} \approx \frac{v_{co} t_{exp}}{r_{co} \theta_{pixel}} \quad (3)$$

式中 v_{co} 为相对运动速度, t_{exp} 为曝光时间, θ_{pixel} 为视场角和像素的比值。

因此拖影量对相对运动速度的约束可以表示为

$$v_{max} \leq r_{co} n \theta_{av} / (t_{exp} N) \quad (4)$$

(3) 最小观测角约束

观测角是指观测方向和被观测点切平面的夹角,当观测角小于临界值时,由于表面遮挡等因素,图像很难满足任务需求。最小观测角约束可以表示为

$$\arccos\left[\frac{-\mathbf{r}_{co} \cdot \mathbf{r}_n}{|\mathbf{r}_{co}| |\mathbf{r}_n|}\right] \leq \frac{\pi}{2} - \delta_{min} \quad (5)$$

式中 \mathbf{r}_n 为被观测表面的法向矢量, δ_{min} 为最小观测角。

(4) 碰撞避免约束

碰撞避免约束表示为^[4-5]

$$r_{\min} \geq R_{\text{safe}} \quad (6)$$

式中 r_{\min} 表示观测航天器到目标航天器表面的最近距离。需要注意的是, 若 R_{safe} 大于图像分辨率对观测距离的约束, 则没有可行解。

从以上的分析可以看出近距离扫描观测是一个多约束问题, 基于改进 APF 的制导方法可以有效处理以上各项约束条件, 且满足实时性的要求, 同时避免传统 APF 方法引起的死锁现象^[1]。

2 基于改进 APF 的制导方法

2.1 改进的 APF 方法

APF 方法主要应用于机器人的路径规划, 其基本思想是将机器人的运动过程视为一种在虚拟的人工受力场的运动。障碍物对机器人产生斥力, 目标点产生引力, 引力和斥力的合力控制机器人的运动方向。这种方法结构简单、反应速度快、计算量小、实时性强, 便于底层的实时控制, 在实时避障和平滑的轨迹控制方面, 得到了广泛应用。其不足在于不能处理图像分辨率、拖影量和最小观测角约束。如图 3 所示, 基于传统 APF 法得到的轨迹显然不能满足表面 BC 弧段的观测需求。此外, 这种方法还存在局部最优解, 容易产生死锁现象。

基于改进 APF 方法的观测轨迹由引力场来提供与观测区域相切且指向目标端面的加速度, 使得观测航天器能够跟随目标区域观测, 避免产生死锁现象, 并利用势场力大小来控制最大相对运动速度, 满足图像拖影量的约束; 再由斥力场来满足最大观测距离、最小观测角和碰撞避免约束。观测航天器的控制加速度表示为所有引力和斥力之和:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_g + \mathbf{a}_o + \mathbf{a}_m + \mathbf{a}_\alpha \quad (7)$$

式中 \mathbf{a}_g 为引力加速度, \mathbf{a}_o 为碰撞避免斥力加速度, \mathbf{a}_m 为最大观测距离斥力加速度, \mathbf{a}_α 为最小观测角斥力加速度。

2.2 制导方法

(1) 引力加速度

引力加速度主要是指由终端位置引力场所产生的加速度, 导引观测航天器从初始位置沿着目标区域运动到终端位置。引力场函数表示为

$$V_g = \frac{\lambda_g}{2} [\mathbf{C}(\theta) \mathbf{r}_{cg}]^T [\mathbf{C}(\theta) \mathbf{r}_{cg}] \quad (8)$$

式中 \mathbf{r}_{cg} 为观测航天器当前位置到终端位置的距离, $\lambda_g \geq 0$ 为比例系数(这里取 $\lambda_g = 1/r_{cg}$), θ 为 \mathbf{r}_{cg} 与被观测点切平面的夹角, $\mathbf{C}(\theta)$ 为 \mathbf{r}_{cg} 到切平面的方向转换矩阵。显然该二次型函数是半正定的。

由引力场所产生的加速度表示为

$$\mathbf{a}_g = (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}) / \Delta t \quad (9)$$

式中 \mathbf{v}_g 为引力场产生的期望相对速度矢量, \mathbf{v} 为观测航天器当前的相对速度矢量, \mathbf{v}_g 表示为

$$\mathbf{v}_g = -k_g v_{\max} (1 - e^{-t}) \left(1 - e^{-\frac{b_g}{V_g} V_g} \right) \frac{\nabla V_g}{\|\nabla V_g\|} \quad (10)$$

式中 ∇V_g 为引力场梯度, $(1 - e^{-t})$ 可以避免在初始时刻控制加速度过大, v_{\max} 为拖影量决定的最大相对运动速度, $k_g (0 \leq k_g \leq 1)$ 、 b_g 为比例因子。 \mathbf{v}_g 保证了除平衡位置($\mathbf{r}_{cg} = 0$)之外是负定的, 因此该制导率可以保证观测航天器能够从初始位置沿表面运动到目标位置。

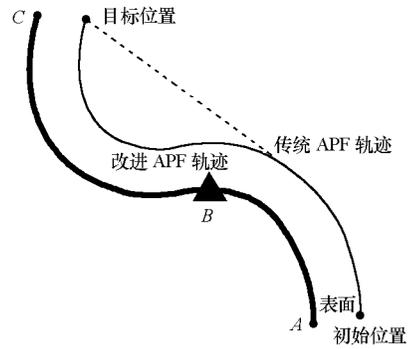


图 3 传统 APF 和改进 APF 方法比较
Fig. 3 The comparison of classical APF and modified APF

(2) 斥力加速度

斥力加速度用于处理各种约束条件,当观测航天器逼近观测空间边界的时候施加斥力加速度来维持其处于观测空间之中。

当观测距离 $r_{co} \leq D_o$ ($D_o = d_o \left(r_{sf} + 0.5v^2/a_{\max} \right)$, d_o 为比例因子) 时,为满足碰撞避免约束,由斥力场产生加速度,表示为

$$\mathbf{a}_o = \left(\mathbf{v}_o - \mathbf{v}_{co} \right) / \Delta t \quad (11)$$

式中 \mathbf{v}_o 为最小观测距离斥力场产生的期望速度, \mathbf{v}_{co} 为当前速度 \mathbf{v} 在 r_{co} 方向的投影, \mathbf{v}_o 表示为

$$\mathbf{v}_o = k_o v_{\max} \left(1 - e^{-b_o \left(\frac{D_o - r_{co}}{r_{co}} \right)} \right) \frac{\mathbf{r}_{co}}{r_{co}} \quad (12)$$

式中 k_o ($0 \leq k_o \leq 1$)、 b_o 为比例因子。

当观测距离 $r_{co} \geq D_m$ ($D_m = d_m \left(D_{\max} - 0.5v^2/a_{\max} \right)$, d_m 为比例因子) 时,为满足分辨率决定的最大观测距离约束,由斥力场产生斥力加速度,表示为

$$\mathbf{a}_m = \left(\mathbf{v}_{cm} - \mathbf{v}_{co} \right) / \Delta t \quad (13)$$

式中 \mathbf{v}_{cm} 为最大观测距离斥力场产生的期望速度,表示为

$$\mathbf{v}_{cm} = -k_{cm} v_{\max} \left(1 - e^{-b_{cm} \left(\frac{r_{co} - D_m}{r_{co}} \right)} \right) \frac{\mathbf{r}_{co}}{r_{co}} \quad (14)$$

式中 k_{cm} ($0 \leq k_{cm} \leq 1$)、 b_{cm} 为比例因子。

当观测角度 $\delta < \delta_o$ ($\delta_o = d_\delta \left(\delta_{\min} + v^2/(2r_{co}a_{\max}) \right)$, d_δ 为比例因子) 时,由最小观测角约束产生的斥力加速度表示为

$$\mathbf{a}_{ca} = \frac{\mathbf{v}_{ca} - \mathbf{v}_a U_{ca}}{\Delta t} \frac{U_{ca}}{U_{ca}} \quad (15)$$

式中 \mathbf{v}_{ca} 为最小观测角斥力场产生的期望相对速度矢量, U_{ca} 为控制加速度的方向, \mathbf{v}_a 为当前速度在 U_{ca} 方向的投影, \mathbf{v}_{ca} 、 U_{ca} 分别表示为

$$\mathbf{v}_{ca} = -k_{ca} v_{\max} \left(1 - e^{-b_{ca} \left(\frac{\delta_o - \delta}{\delta} \right)} \right) \frac{U_{ca}}{U_{ca}} \quad (16)$$

$$U_{ca} = \mathbf{r}_n - \mathbf{r}_n \frac{r_{co}}{r_{co}} \cos \delta \quad (17)$$

式中 k_{ca} ($0 \leq k_{ca} \leq 1$)、 b_{ca} 为比例因子。

3 仿真算例

假设目标航天器在 450km 的圆轨道上运行,观测航天器相机的视场角为 $30^\circ \times 30^\circ$,曝光时间是 0.2s, CCD 面阵的像素为 1024×1024 ,质量为 10kg,装有 6 个双向推力器,每个推力器所能提供的最大推力为 10mN,要求分辨率高于 0.5cm,拖影量少于一个像素。针对两种不同的表面形状进行扫描观测,如图 4、5 所示,观测航天器的初始相对位置用“○”表示,初始相对运动速度为 0,终点相对位置用“□”表示。

两种不同形状的扫描观测轨迹如图 4、5 所示,第一种形状的任务时间为 4217.7s,速度增量为 0.3786m/s;第二种形状的任务时间为 3975.3s,速度增量为 0.3102m/s。从图中可以看出观测轨迹能够很好地跟随目标区域飞行,且所需要的速度增量不大,说明本文提出的贴近扫描观测的制导方法是有效的。

4 结论

本文针对大型空间非合作目标的近距离扫描观测问题,提出了一种基于改进的人工势场法的制导方法。应用这种方法可以方便地处理拖影量、分辨率和碰撞避免等约束条件,实现观测航天器对目标区

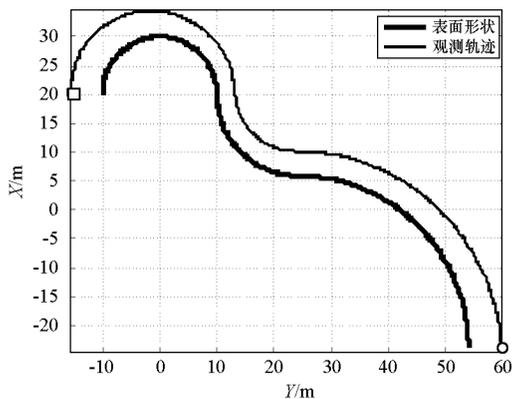


图4 第一种形状的观测轨迹

Fig. 4 The first observation trajectory

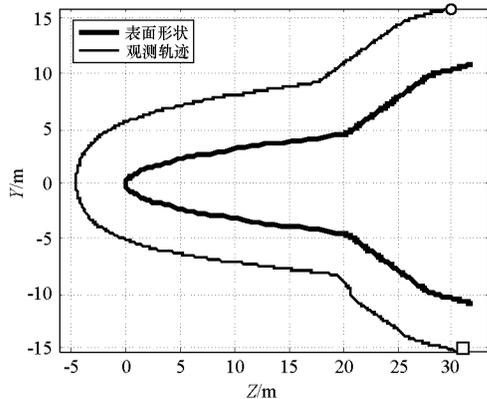


图5 第二种形状的观测轨迹

Fig. 5 The second observation trajectory

域连续跟踪的扫描观测,且所需计算量小,便于星上实时处理。仿真结果表明,应用这种制导方法可以使得观测航天器很好地跟随目标区域的形状特征,且所需要的速度增量较小。这种方法也可以应用于空间合作目标的贴近扫描观测,由于合作目标的三维特性已知,可以进一步建立优化模型来优化观测时间、能量消耗等性能指标。

参考文献:

- [1] Edwards C M. Proximity Operations of a Miniature Inspector Satellite Using Emulated Computer Vision [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [2] Fredrickson S E, Duran S, Mitchell J D. Mini AERCam Inspection Robot for Human Space Missions [C]//Space 2004 Conference and Exhibit, California, September 2004.
- [3] Jacobovits A, Vaneck T W. AeroAstro's Escort-A Microsatellite for On-Orbit Inspection of Space Assets[R]. SSC03- IV- 07, 2003.
- [4] Roger A B, McInnes C R. Safety Constrained Free-Flyer Path Planning at the International Space Station[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2000, 23(6): 971- 979.
- [5] Choset H, Knepper R, Kortenkamp J D, et al. Path Planning and Control for AERCam, a Free-flying Inspection Robot in Space[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, May 1999.
- [6] McCamish S B, Romano M, Yun X P. Autonomous Distributed Control Algorithm for Multiple Spacecraft in Close Proximity Operations[C]//AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit, Carolina Canada, August 2007.
- [7] Martinson N, Munoz J D. A New Method of Guidance Control for Autonomous Rendezvous in a Cluttered Space Environment[C]//AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit Carolina, August 2007.
- [8] John E J, Kluza J. Low- Complexity Spacecraft Guidance Using Artificial Potential Functions[R]. IEEE 1- 4244- 1057, 2007.
- [9] 朱彦伟, 杨乐平, 任仙海. 一种基于导航点的航天器相对运动轨迹生成策略[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(3): 1- 4.
- [10] Kim S C. Mission Design and Trajectory Analysis for Inspection of a Host Spacecraft by a Microsatellite[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2006.