

探测器交会小天体的 UPF 自主导航方案

李 鹏, 崔祜涛, 崔平远

(哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 哈尔滨 150080)

摘要:采用基于目标天体信息的光学导航方案实现探测器交会小天体,利用导航相机提高了定轨精度和星历精度。在此基础上,针对深空导航的轨道确定过程中可能存在的初始估计信息误差较大、状态及量测误差不服从高斯分布等问题,将 UPF(Unscented Particle Filter)引入到导航方案中。该方案利用 UPF 在处理非线性非高斯问题上的优势,克服了 EKF、UKF、PF 等传统滤波方案对非线性非高斯状态模型、量测模型的近似处理所带来的影响。数值仿真表明了该方案的可行性。

关键词:飞行器控制与导航技术;自主光学导航;Unscented 粒子滤波;非线性非高斯;自主轨道确定

中图分类号:V44 文献标识码:A 文章编号:1671-5497(2007)03-0691-05

UPF based autonomous navigation scheme for probe encountering small celestial body

Li Peng, Cui Hu-tao, Cui Ping-yuan

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: On the basis of the optical navigation scheme with objective celestial body information, the encounter task is realized. The accuracies of orbit determination and ephemeris are improved by using navigation camera. On this basis, the Unscented Particle Filter (UPF) is introduced to the navigation scheme to overcome the shortcomings of large initial estimation errors and non-Gaussian distribution of the state or measurement errors that may exist in the determination of the deep space orbit. Taking the advantage of UPF in tackling nonlinear and non-Gaussian problems, the disadvantages in the approximate treatments of nonlinear and non-Gaussian state model and measurement model by traditional EKF, UKF and PF schemes are also gotten over. The feasibility of the proposed scheme is demonstrated by numerical simulations.

Key words: control and navigation technology of aerocraft; autonomous optical navigation; unscented particle filter; nonlinear and non-Gaussian; autonomous orbit determination

收稿日期:2006-05-23.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2005AA735080).

作者简介:李鹏(1980-),男,博士研究生. 研究方向:深空探测自主导航与控制. E-mail:lipeng@astro.hit.edu.cn

通讯联系人:崔平远(1961-),男,教授,博士生导师. 研究方向:飞行器飞行动力学建模与控制.

E-mail:cui@astro.hit.edu.cn

多普勒径向测速与测距相结合是深空探测常用的自主导航方法,但对于交会段的导航任务,考虑到目标天体较大的初始星历误差(约 1500 km)以及任务实时性的需要,利用导航相机提高目标天体星历精度的光学导航方案更为可取。作者以美国星尘号(Stardust)交会小天体为背景^[1,2],给出了实现此方案的基本过程。然而,无论是传统的导航还是光学导航,在建立系统方程时,一般假设非主要摄动项、过程噪声、量测噪声均为零均值高斯白噪声,进而采用 EKF 或 UKF 进行轨道确定。这种假设建立在状态变量的分布为近似高斯分布的基础上,而事实上状态变量的实际分布依赖于精确的摄动模型而非高斯分布,当这种非高斯性加重或者过程噪声、量测噪声明显不是高斯分布时,EKF 或 UKF 的滤波性能将降低^[3]。

基于蒙特卡罗算法的粒子滤波(PF)能处理任意非线性函数和非高斯分布。Gordan, Gustafsson 等提出并综述了 PF 在定位、导航和制导方面的应用^[4,5], Soohong 和 Azimi-Sadjadi 将 PF 应用到地磁轨道确定或 INS/GPS 导航中^[6,7]。PF 算法以验前概率密度作为重要性采样密度函数。相比之下,R. V. Merwe 于 2000 年提出^[8]的采用 UKF 得到重要性采样密度函数的 UPF 算法,克服了标准的 PF 未考虑最新量测信息和 UKF 只适用于高斯噪声的缺点。

针对现有研究大多将 UPF 用于目标跟踪或近地卫星导航定位,而较少用于深空自主导航尤其是交会任务的现状,作者提出将 UPF 与基于目标天体信息的自主光学导航相结合,解决非线性、非高斯系统的轨道确定问题,取得了较好效果。

1 基于目标天体信息的光学导航

1.1 总体方案

利用导航相机,在接近目标天体的 100 天左右(相机能看见目标天体)开始拍照,此后逐渐加大拍照频率,利用图像信息来提高定轨精度和星历精度;然后计算和执行轨道机动,将探测器送到预定的交会初始位置,直到启动目标天体自主跟踪程序,完成交会任务。基本原理如图 1 所示。

方案采用以目标天体为中心的惯性坐标系描述,这样的相对坐标系可以大大削弱星历误差以及日地距离误差带来的影响,从而提高导航精度。

1.2 量测方程的建立

目标小天体经过“导航相机系统”、“图像预处

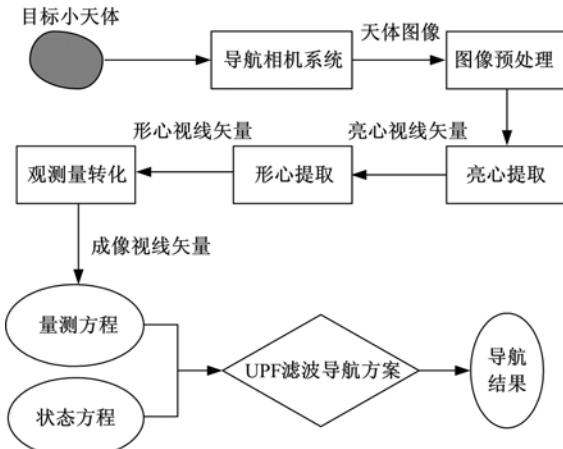


图 1 导航总体方案

Fig. 1 Overall scheme of navigation

理”、“亮心提取”、“形心提取”、“观测量转化”共 5 个步骤形成量测方程。

(1) 导航相机系统

导航相机系统一般由 CCD 相机、反射镜、潜望镜组成。详细过程参考 Stardust 任务^[2]。

(2) 图像预处理

是对相机系统得到的小天体图像进行常规的灰度、消噪等标准化处理,以备下一步使用。

(3) 亮心提取

目的是将目标天体的图像转化为亮心视线矢量。考虑到深空探测任务的自主性、交会任务的实时性以及目标天体信息的未知性等条件约束,采用简单、高效的亮心提取算法如下

$$p_{cb} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N i P_{ij}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N P_{ij}}, \quad l_{cb} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N j P_{ij}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N P_{ij}} \quad (1)$$

式中: P_{ij} 是像元 i 像线 j 处亮度值; N 取 1024; p_{cb} 、 l_{cb} 是计算所得亮心; P_{ij} 限定为

$$P_{\min} \leqslant P_{ij} \leqslant P_{\max} \quad (2)$$

式中: P_{\min} 为最低背景噪声值; P_{\max} 是最大容许峰值。具体的参数值由对目标天体的在轨建模和校准过程决定。

(4) 形心提取

通过对非球形目标天体亮心做修正得到形心

$$p_0 = p_{cb} - \gamma R_c \cos \phi, \quad l_0 = l_{cb} - \gamma R_c \sin \phi \quad (3)$$

式中: γ 为修正系数,在 0 到 1 范围内取值; R_c 为目标天体等效半径 R 转换成的像元、像线值,由探测器到目标天体的距离 ρ 、相机转换矩阵分量 K_x 、相机焦距 f 共同决定,即 $R_c = R K_x f / \rho$; ϕ 是成像坐标系中的太阳视线方向矢量。

(5) 观测量转化

为了计算目标天体在相机视场中的位置,需要将惯性视线矢量转化成相机像元、像线矢量。

首先,需要惯性系到探测器本体坐标系的转换阵 \mathbf{T}_{IB} ,这个矩阵可以由探测器的姿态控制系统得到;然后,需要探测器本体坐标系到相机坐标系的转换矩阵 \mathbf{T}_{BC} ,这个矩阵由该历元相机相对探测器的位置决定。这样就确定了惯性系到相机坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{T}_{IC} = \mathbf{T}_{IB} \mathbf{T}_{BC}$ 。由此,把惯性视线矢量 \mathbf{V}_I 转化为相机坐标系上的矢量 \mathbf{V}_C

$$\mathbf{V}_C = [\mathbf{V}_{C1} \quad \mathbf{V}_{C2} \quad \mathbf{V}_{C3}] = \mathbf{T}_{IC} \mathbf{V}_I \quad (4)$$

再把 \mathbf{V}_C 转化到 2-D 相机焦平面上

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{\mathbf{V}_{C3}} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{C1} \\ \mathbf{V}_{C2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

不考虑电磁和光畸变的影响,得到像元像线

$$\begin{bmatrix} p \\ l \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_0 \\ l_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & K_{xy} & K_{xxy} \\ K_{yx} & K_y & K_{yy} \end{bmatrix}$ 为相机转换矩阵;

p_0 、 l_0 分别为 CCD 相机中心的像元和像线。

(6) 量测方程

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p(r, \lambda, \delta, \varphi, t) \\ l = l(r, \lambda, \delta, \varphi, t) \\ \lambda = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{T}_{IB}(1,2)}{\mathbf{T}_{IB}(1,1)} \right) \\ \delta = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{T}_{IB}(1,3)}{A} \right) \\ \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{T}_{IB}(2,3)}{\mathbf{T}_{IB}(3,3)} \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$ 为探测器到目标天体中心的距离; $A = \sqrt{\mathbf{T}_{IB}(1,1)^2 + \mathbf{T}_{IB}(1,2)^2}$ 。

1.3 状态方程的建立

在探测器交会小天体的任务中,由于飞越距离很大(大于 100 km),而小天体的质量很小,所以可以忽略其引力引起的探测器的轨道变化。同时,在约 20 min 的最终交会过程中,太阳引力、太阳光压摄动以及其他九大行星的引力摄动都可以作为噪声处理,并且在交会任务中没有轨道机动过程,在这样的假设下,状态模型可以近似为线性

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{X}_{t_0} + \dot{\mathbf{X}}_t(t - t_0) \quad (8)$$

式中: \mathbf{X} 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 分别为探测器在以目标天体为中心的 J2000 地球平赤道相对坐标系中的位置和速度矢

量。

2 UPF 滤波算法

2.1 粒子滤波(PF)基本思想

PF 用一系列带有权值的随机采样点来表示所需要的后验概率密度函数,再利用这些采样点和权值来得到最终的估计量。当采样点数足够多时,采样值的统计特性近似于后验概率密度的统计特性。算法适用于非线性函数和非高斯分布,相对 EKF、UKF 等具有一定优势。标准的 PF 易存在样本抽取偏差较大及退化现象,而单纯地增加粒子数和重采样则会加大计算复杂度且降低粒子多样性。因此选择好的重要性采样密度函数是改善 PF 性能的重要途径^[9]。

2.2 UPF 算法

UPF 利用 UKF 可得到比标准 PF 更好的重要性函数 $q(x_k^{(i)} | x_{0:k-1}^{(i)}, y_{1:k})$,每一次采样后的粒子都由 UKF 算法进行更新,所得的均值和方差用于下次采样新的粒子。算法的基本步骤如下。

Step1: 初始化

取 $k=0$,抽取 N 个采样点(粒子)

$$x_0^{(i)} \sim p(x_0), \text{令 } w_0^{(i)} = 1/N, i = 1, \dots, N \quad (9)$$

当 $k=1, 2, \dots$ 时,开始循环。

Step2: 重要性采样

对每个粒子 $x_{k-1}^{(i)}$,由 UKF 算法得到 $\bar{x}_k^{(i)}$, $P_k^{(i)}$,进而得到重要性函数

$$q(x_k^{(i)} | x_{0:k-1}^{(i)}, y_{1:k}) = N(\bar{x}_k^{(i)}, P_k^{(i)}) \quad (10)$$

抽样 $x_k^{(i)} \sim q(x_k^{(i)} | x_{0:k-1}^{(i)}, y_{1:k})$ 得到粒子 $\{x_x^{(i)}\}_{i=1}^N$ 。

Step3: 权值更新

$$w_k^{(i)} = w_{k-1}^{(i)} \frac{p(y_k / x_k^{(i)}) p(x_k^{(i)} / x_{0:k-1}^{(i)})}{q(x_k^{(i)} | x_{0:k-1}^{(i)}, y_{1:k})} \quad (11)$$

$$\text{归一化: } \tilde{w}_k^{(i)} = w_k^{(i)} / \sum_{j=1}^N w_k^{(j)} \quad (12)$$

Step4: 重采样

将带权粒子 $\{x_{0:k}^{(i)}, \tilde{w}_k^{(i)}\}$ 映射为等权粒子 $\{\tilde{x}_{0:k}^{(i)}, N^{-1}\}$ 。本文采用随机重采样^[8],即依据权值的概率对带权粒子重新采样,如图 2 所示。

Step5: 得到估计值

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_k^{(i)} \quad (13)$$

设置 $k=k+1$,当下一量测值到来时,执行 Step2。

从 Step2 可以看出, $\bar{x}_k^{(i)}$ 与 $P_k^{(i)}$ 是用 UKF 计算的均值和协方差。尽管后验概率密度函数可能

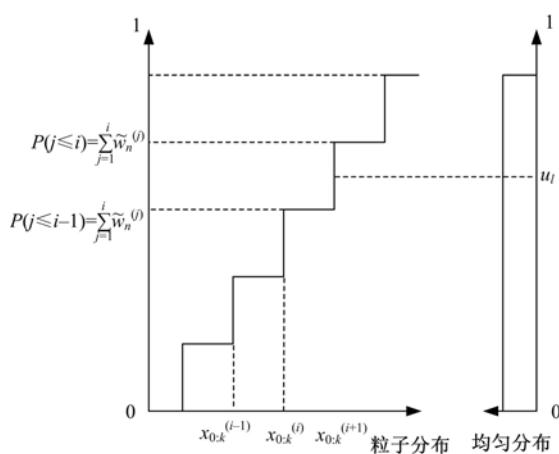


图 2 随机重采样原理

Fig. 2 Principle of random resampling

不服从高斯分布,但用高斯分布来近似每个粒子的分布是可行的,而且 UKF 估计后验概率密度到二阶项,较好地保持了系统的非线性。

3 引入 UPF 的交会导航

3.1 仿真条件

(1) 系统参数

相机透镜焦距 $f = 200 \text{ mm}$; CCD 分辨率为 1024×1024 ; 相机视场为 3.5° ; 相机快门的曝光控制时间最快为 5 ms , 最慢为无穷大曝光。

K 中交叉项设为零, 初始值 $K_x = K_y = 83.8 \text{ pixel/mm}$, 在轨飞行时通过观测校准确定其值。

姿态角初值:

$$\lambda = 0.001, \delta = 0.003, \varphi = -0.001.$$

轨道初始标称值

$$\begin{aligned}\vec{r}_0 &= [-7200 \ 0 \ 150] \text{ km}, \\ \vec{v}_0 &= [6 \ 0 \ 0] \text{ km/s}\end{aligned}$$

轨道初始误差

$$\vec{d}r_0 = [150 \ 8 \ 8] \text{ km},$$

$$\vec{dv}_0 = [10^{-4} \ 10^{-4} \ 10^{-4}] \text{ km/s}$$

(2) UPF 滤波参数

状态的真实初值

$$X(0) = [\vec{r}_0 \ \vec{v}_0]$$

滤波器的滤波初值

$$\hat{X}(0 | 0) = X(0) + [\vec{d}r_0 \ \vec{dv}_0]$$

初始状态的估计误差协方差阵

$$P =$$

$$\text{diag}[22500 \ 64 \ 64 \ 3.046 \times 10^{-6} \ 3.046 \times 10^{-6} \ 3.046 \times 10^{-6}]$$

系统噪声服从 Gamma 分布: $\omega(t) \sim \Gamma(3, 2)$;

量测噪声为零均值高斯白噪声; 初始姿态误差: 0.1° ; 随机姿态误差: $(1.9 \times 10^{-4})^\circ$; 陀螺漂移速率: $0.0033^\circ/\text{h}$; 陀螺随机游走系数: $0.025^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。

需要指出, 系统噪声取 Gamma 分布并非是对系统模型不确定性的真描述, 由于 Gamma 分布描述模型不确定性, 一定程度上比指数分布和正态分布更具有普遍性, 而 UPF 较 UKF 及 PF 的优势也体现在对非高斯分布的处理性能上, 所以此处采用 Gamma 噪声进行问题分析^[10]。

取 UPF 粒子数目 $N = 200$, 取 UKF 滤波参数 $n = 6, \tau = -3$ 。

3.2 Monte Carlo 仿真结果

在上述标称轨道及滤波初始条件下, 将 UPF 应用于导航方案。由于轨道模型是线性化的简化模型, 不需要对探测器的速度进行估计, 待估参数主要是三轴位置分量。采用 Monte Carlo 方法进行 100 次仿真, 得到的探测器 X、Y、Z 三轴的位置估计误差仿真结果如图 3—图 5 所示。

在同样仿真条件下, 将 UKF、PF 用于导航方案^[3], 与 UPF 方案的导航精度比较如表 1 所示。

仿真结果及数据分析表明, UPF 方案满足交

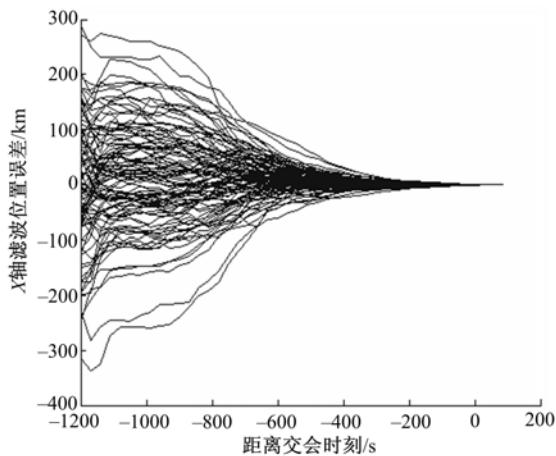


图 3 UPF 方案 X 轴位置误差曲线

Fig. 3 X-axis position error curves of UPF scheme

表 1 三种滤波导航方案精度比较

Table 1 Navigation accuracy comparison of the three schemes

误差/km	UKF	PF(N=400)	UPF(N=200)
X 轴平均误差	43.873	40.449	37.024
Y 轴平均误差	1.0580	0.9118	0.7642
Z 轴平均误差	2.6201	2.1908	1.7614
X 轴收敛误差	0.2717	0.1613	0.0510
Y 轴收敛误差	0.2157	0.2406	0.1923
Z 轴收敛误差	0.4292	0.3970	0.0529

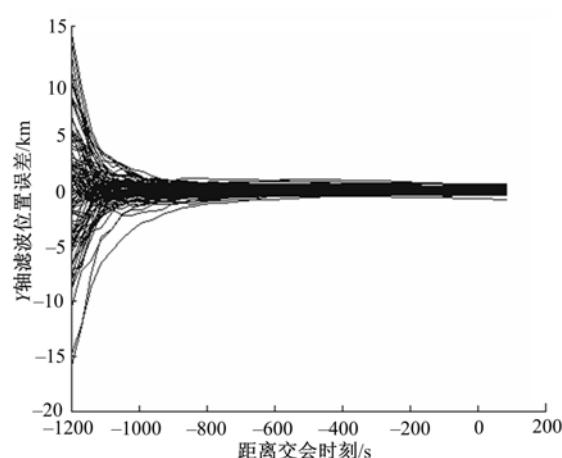


图 4 UPF 方案 Y 轴位置误差曲线

Fig. 4 Y-axis position error curves of UPF scheme

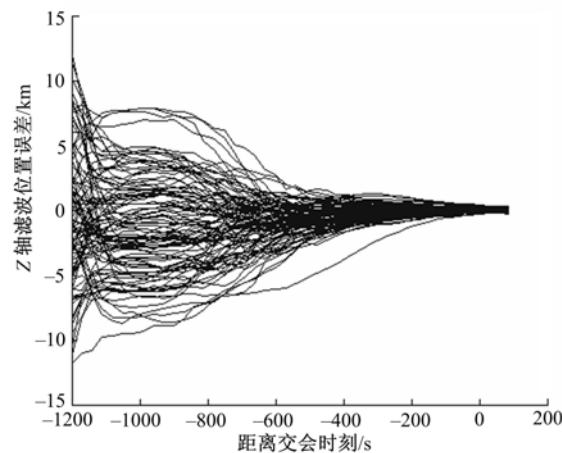


图 5 UPF 方案 Z 轴位置误差曲线

Fig. 5 Z-axis position error curves of UPF scheme

会精度,且性能明显优于 UKF 及 PF。要满足同样的精度,PF 所需粒子数目将远大于 UPF。

从仿真时间看,PF 耗时最长,而 UKF 最短。可见,计算效率较低是粒子滤波器的缺点。实际上,由于深空导航并不要求连续地进行状态的估计,导航计算机性能也不断提升,因此,UPF 滤波一定程度上可以满足航天工程实时性的要求。

4 结束语

采用基于目标天体信息的光学导航方案,实现了探测器交会小天体任务,并针对系统的非线性非高斯性问题,引入 UPF 滤波算法;在系统状态模型噪声为非高斯分布的条件下,对 UKF、PF、UPF 三种滤波方案进行了仿真和分析,表明了 UPF 方案在处理此类光学导航问题中的优越性。

值得注意的是,虽然 UPF 对于非线性非高斯

系统的滤波性能优于传统的滤波器,但这是以增加系统计算复杂度为代价的,在实时性要求很高的场合,应当对 UPF 的滤波参数选择做严格的定量分析;此外,对系统状态模型非高斯噪声的添加是出于问题分析的角度而并非是对模型的精确描述,如何针对不同的系统选择和规划非高斯噪声的准确分布将是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [2] Bhaskaran S, Riedel J E, Synnott S P. Autonomous nucleus tracking for comet/asteroid encounters: the STARDUST example [C] // Proceedings of 1998 IEEE Aerospace Conference, Aspen, CO, 1998: 353-365.
- [3] Bhaskaran S, Riedel J E, Synnott S P. Autonomous target tracking of small bodies during flybys [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2004, 119: 2079-2096.
- [4] Gordan J N, Salmond D J, Smith A F M. A novel approach to non-linear/non-Gaussian bayesian state estimation[J]. IEE Proceedings F, 1993, 140 (2): 493-500.
- [5] Gustafsson F, Gunnarsson F, Bergman N, et al. Particle filters for positioning, navigation, and tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2): 425-437.
- [6] Soohong K, Joohwan C. Satellite orbit determination using a magnetometer-based bootstrap filter [J]. Proceedings of the American Control Conference, 2000, 2: 792-793.
- [7] Azimi-Sadjadi B. Nonlinear filtering with applications to navigation[R]. College Park: University of Maryland, 2001.
- [8] Merwe R V, Doucet A, Freitas N De, et al. The unscented particle filter [R]. Technical Report CUED/F2INPENG/TR 380: Cambridge University Engineering Department, 2000.
- [9] Doucet A. On sequential simulation based methods for bayesian filtering[R]. Technical Report CUED/F2IN2 FENG/TR310: Cambridge University Engineering Department, 1998.
- [10] Gorbunov A V. Non-gaussian infinite-dimensional analysis in the case of gamma-noise (biorthogonal approach) [R]. Conference on Stochastic Differential and Differentia Equations: Hungary, 1996.