一种基于天体观测的月球车位置姿态确定方法

宁晓琳 房建成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对月球车提出了一种基于天文观测的自主位置姿态确定方法. 建立了利用天体敏感器测量得到的天体高度和方位作为观测信息的量测方程,并利用月球车运动的三阶常加速(CA,Constant Aceeleration)模型和姿态的欧拉角运动模型作为系统方程,给出了基于 Unscented 卡尔曼滤波获得月球车实时位置、速度和姿态信息的导航方法. 计算机仿真表明该方法可达到较高的位置姿态确定精度.

关 键 词: 深空探测; 月球车; 自主导航; 姿态确定; 天文导航

中图分类号: V 448.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0756-04

Position and pose estimation by celestial observation for lunar rovers

Ning Xiaolin Fang Jiancheng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: At a given time the altitude and azimuth of celestial bodies measured by star sensor and other celestial body measure devices contain the information of lunar rover's position and pose. So the position and pose of lunar rovers can be determined using this kind of information. A new autonomous position and pose estimation method for lunar rovers based on celestial observation and unscented kalman filter(UKF) method was described. The principle of this method was introduced, and the rover motion models and the measurement equations of altitude and azimuth used in this autonomous celestial navigation system were presented. Because this method only uses the accuracy measurement coming from the star sensor, it has higher precision of position and pose determination. A simulation result demonstrated the validity and feasibility of this new method.

Key words: deep space exploration; lunar rover; autonomous navigation; pose estimation; celestial navigation

月球车要提高生存能力并且成功完成科学探测任务,就必须实现自主运行和管理,其中关键技术之一是获取自身的位置和速度信息. 月球车通常借助地面站通过无线电测控进行导航控制,但由于地球和月球的自转和公转运动以及所带来的地面站和月球车相对地理位置的变化等,有时月球车会处于地面站无法测控的区域内,因此月球车利用自身携带的测量设备进行自主导航控制已经成为重要的发展方向. 通常对地面车辆进行自主导航的方法如地图匹配、陆标识别以及航位推算等应用在深空探测的漫游车上时均存在一定的局限性. 要利用地图匹配方法就需要提前获取要探测天体的详细地图. 要使用陆标识别方法,就必须在要探测天体表面上设置多个陆标. 航位推算法的不足之处则在于,当漫游车要在大范围内移动时,其误差会随时间积累. 天文导航是一种传统的完全自主的导航方法,它可以同时提供位置和姿态信息,且精度不受时间、距离长短的影响. 因此借助太阳、地球及恒星的观测信息进行定位、定向的天文导航方法和与其他方法如航位推算法相结合的组合导航方法已成为漫游车长距离自主导航定姿的主要方法.

收稿日期: 2005-07-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574086);国家民用航天预研资助项目(科工计[2002]439 号文)

作者简介: 宁晓琳(1979-),女,山东济南人,博士生,ningxiaolin@ aspe. buaa. edu. cn.

由于所采用的观测量及估计方法的不同,漫游车天文导航定姿的具体方法也有很多种. Benjamin 等研究了传统航海中的天文导航方法在火星车上的应用,介绍了天文导航的基本原理以及相应的天体星历表生成方法[1]. E. Krotkov 等研究了一种利用对太阳高度的连续观测,通过最小二乘法求解天文位置圆非线性方程组,获得漫游车固定点位置的天文导航方法[2-3]. Kuroda 等研究了将利用太阳、地球的观测信息获得位置和航向的天文导航方法与航位推算法相结合的月球车组合导航方法[4]. R. Trautner 等研究了利用火星卫星(火卫一、火卫二)和恒星之间的星光角距作为观测信息对登陆器进行导航的方法[5]. Richard Volpey 研究了利用太阳敏感器确定火星车航向的方法[6]. Satoko 等研究了利用对太阳方向的观测确定漫游车姿态的方法[7]. 本文在上述研究的基础上,针对月球车提出了一种以天体高度和方位作为观测信息,利用月球车运动的当前统计模型和姿态的欧拉角运动学模型,作为系统方程的基于 Uncented 卡尔曼滤波 UKF(Unscented Kalman Filter)的导航方法. 该方法不仅可同时提供月球车的位置和姿态信息,而且由于仅使用了来自高精度天体敏感器的观测信息,因此也具有更高的导航精度. 最后通过计算机仿真验证了该方法的有效性.

1 月球车自主天文导航定姿基本原理

由于自然天体总是按其固有规律运动,它们在某个时刻相对特定坐标系的位置矢量可以精确得到. 对于月球车来说,一个天体的高度(星光方向与水平方向之间的夹角)和方位(星光方向在地平上的投影与正东方向之间的夹角)取决于月球车的位置和姿态. 因此通过测量一个天体的高度和方位,就可以获得有关月球车地理位置和姿态的信息.

为了便于分析,先不考虑月球车的姿态,即假设月球车的 3 个姿态角均为 0,月球车本体坐标系与当地水平坐标系重合时,天体在月球车当地水平坐标系中的高度和方位仅与月球车的位置(经纬度)有关,如图 1 所示,其表达式为[7]

$$H_1 = \arcsin(\sin\varphi \cdot \sin\Delta + \cos\varphi \cdot \cos\Delta \cdot \cos t_{\mathrm{LHA}})$$

$$A_{z_1} = \arctan\left(\frac{-\cos\Delta\sin t_{\mathrm{LHA}}}{\cos\varphi \cdot \sin\Delta - \sin\varphi \cdot \cos\Delta \cdot \cos t_{\mathrm{LHA}}}\right)$$

$$t_{\mathrm{LHA}} = t_{\mathrm{GHA}} + \lambda \tag{1}$$

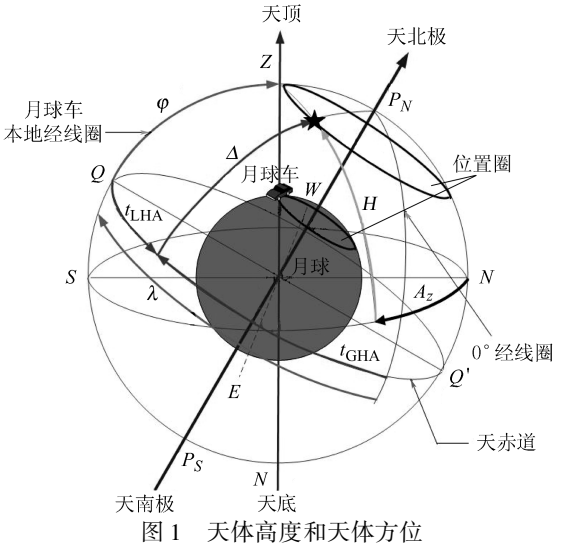


图 1　天体高度和天体方位

其中,H_1,A_{z_1}为在当地水平坐标系中天体的高度和方位值;λ,φ 为月球车在天体固连坐标系中的经纬度;Δ,t_{LHA}分别代表天体的赤纬和地方时角,其中地方时角 t_{LHA}为天体的格林时角 t_{GHA}(0°经线处的地方时角)和月球车所在位置的经度 λ 之和,且经度为东经,λ 取正;经度为西经,λ 取负. 当有多个天体的观测值时,根据式(1)就可建立一个方程组,求解该方程组即可获得月球车的位置,即 λ,φ.

当月球车的 3 个姿态角不全为 0 时,由月球车上的天体敏感器实际测得的天体高度和方位是天体在月球车本体坐标系中的高度和方位 H_{b},$A_{z_{\mathrm{b}}}$与 H_1,A_{z_1}的关系为

$$\begin{bmatrix}\cos H_1\cos A_{z_1}\\ \cos H_1\sin A_{z_1}\\ \sin H_1\end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{l}} \cdot \begin{bmatrix}\cos H_{\mathrm{b}}\cos A_{z_{\mathrm{b}}}\\ \cos H_{\mathrm{b}}\sin A_{z_{\mathrm{b}}}\\ \sin H_{\mathrm{b}}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{l}} = \begin{bmatrix}\cos\varphi\cos\Psi - \sin\phi\sin\Psi\sin\theta & -\sin\Psi\cos\theta & \cos\Psi\sin\phi + \sin\Psi\sin\theta\cos\phi\\ \cos\phi\sin\Psi + \sin\phi\cos\Psi\sin\theta & \cos\Psi\cos\theta & \sin\Psi\sin\phi - \cos\Psi\sin\theta\cos\phi\\ -\cos\theta\sin\phi & \sin\theta & \cos\theta\cos\phi\end{bmatrix} \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{R}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{l}}$ 为姿态矩阵;Ψ 为航向角;ϕ 为横滚角;θ 为俯仰角[8]. 因此实际由天体敏感器测得的天体高度和方位是由月球车自身的位置和姿态决定的. 具体方法是利用天体敏感器测量该天体相对于本体坐标系的高度和方位. 通过观测时间,从星历表中获取天体的星历信息 Δ,t_{LHA}. 有了上述信

息,就可以根据下面的方法得到月球车的位置和姿态.

2 月球车自主天文导航系统数学模型

在讨论月球车的运动时,通常采用选取历元(J2000.0)的月固坐标系 $O_{\mathrm{L}}xyz$ 为参考系. 该坐标系原点为月心,参考平面是月球赤道面,$O_{\mathrm{L}}x$ 轴通过月面上的 Sinus Medii,$O_{\mathrm{L}}z$ 轴顺月球自转方向[9]. 月球车在该坐标系中的自主导航定姿系统的状态模型为[10-11]

$$\left.\begin{aligned}
\dot{\lambda} &= v_\lambda \\
\dot{v}_\lambda &= a_\lambda \\
\dot{a}_\lambda &= n_{a\lambda} \\
\dot{\varphi} &= v_\varphi \\
\dot{v}_\varphi &= a_\lambda \\
\dot{a}_\varphi &= n_{a\varphi} \\
\dot{\Psi} &= \frac{(w_{gy}-d_y)\sin\phi+(w_{gz}-d_z)\cos\phi}{\cos\theta}+n_\Psi \\
\dot{\theta} &= (w_{gy}-d_y)\cos\phi-(w_{gz}-d_z)\sin\phi+n_\theta \\
\dot{\phi} &= (w_{gx}-d_x)+(w_{gy}-d_y)\tan\theta\sin\phi+ \\
&\quad (w_{gz}-d_z)\tan\theta\cos\phi+n_\phi \\
\dot{d}_x &= 0 \\
\dot{d}_y &= 0 \\
\dot{d}_z &= 0
\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

令状态矢量 $\boldsymbol{X}=[\lambda,v_\lambda,a_\lambda,\varphi,v_\varphi,a_\varphi,\Psi,\theta,\phi,d_x,d_y,d_z]^{\mathrm{T}}$,其中各状态量分别为月球车在东向和北向的位置(经纬度)、速度和加速度、3个姿态角和三轴陀螺的常值漂移;w_{gx},w_{gy},w_{gz} 为三轴陀螺的测量输出. $\boldsymbol{N}=[0,0,n_{a\lambda},0,0,n_{a\varphi},n_\Psi,n_\theta,n_\phi,0,0,0]^{\mathrm{T}}$ 为状态模型噪声. 则由式(3)可得到天文导航系统的状态方程,简写为

$$\dot{\boldsymbol{X}}(t)=f[\boldsymbol{X}(t),t]+\boldsymbol{N}(t) \tag{4}$$

以测得的天体高度 H_{b} 和方位 $A_{z_{\mathrm{b}}}$ 作为观测量的系统量测方程可由式(1)、(2)得到,简写为

$$\boldsymbol{Z}(t)=[H_{\mathrm{b}},A_{z_{\mathrm{b}}}]^{\mathrm{T}}=h[\boldsymbol{X}(t),t]+\boldsymbol{v}(t) \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{v}(t)$ 为量测噪声.

有了状态方程和量测方程就可选择适当的滤波估计方法对上述状态信息进行最优估计,获得月球车的位置和姿态. 由于上述系统的量测方程是非线性的,所以非线性的滤波方法是较适于这类系统的估计方法. 同时由于状态量较多,考虑到计算量不宜过大,因此在此采用 UKF 方法.

UKF 的核心思想是用确定的采样点来近似状态分布,选择采样点来捕获状态分布的真实均值和方差. 令这些采样点通过非线性系统,产生相应的变换采样点. 由此可以计算变换采样点的均值和方差. 经过非线性变换得到的采样点的分布以三阶精度近似于真实的均值和方差. UKF 的具体滤波步骤可参考文献[12].

3 计算机仿真及结果

3.1 仿真条件

仿真中月球车的行进路径选用美国勘探者3号探测器的着陆地点(月球南纬 2°56′,东经 336°40′)作为起点,月球车以约 1 km/h 的速度匀速运行 2 h. 在运行过程中 3 个姿态角均保持不变,其中航向角为 45°,横滚角和俯仰角为 0°. 具体仿真条件如下:

1) 坐标系. J2000.0 月固坐标系,月球半径为 1 738 km.

2) 测量仪器的精度. 天体敏感器:在此采用星敏感器,精度为 10″(1σ),视场为 10°×10°,更新频率为 0.5 Hz,并假设星敏感器光轴沿月球车本体坐标系 z 轴方向,即安装坐标系与月球车本体坐标系重合.

陀螺:在此采用 MEMS 陀螺,陀螺的常值漂移为 20°/h,陀螺随机噪声标准差为 2°/h . 陀螺的采样频率是 20 Hz. 3 只陀螺的敏感轴分别与月球车本体轴 x, y, z 平行.

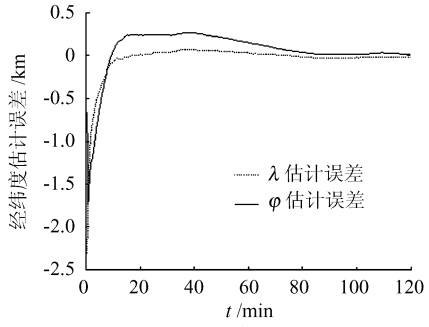
3) 导航星历采用 JPL405 恒星行星星历,仿真用星图由 Starry Night Backyard 软件提供,相应的坐标转换方法参考文献[9],平均星历误差 2″.

4) 滤波周期:$T=20$ s

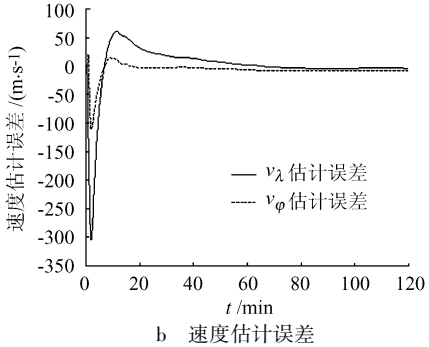
5) 滤波参数:滤波器的初值 $\boldsymbol{Q}_0=\mathrm{diag}[(1\times10^{-1})^2,(1\times10^{-3})^2,(1\times10^{-3})^2,(1\times10^{-1})^2,(1\times10^{-3})^2,(1\times10^{-3})^2,(5\times10^{-3})^2,(5\times10^{-3})^2,(5\times10^{-3})^2,(1\times10^{-4})^2,(1\times10^{-4})^2,(1\times10^{-4})^2]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{X}_0=\boldsymbol{X}_{\mathrm{t}}+d\boldsymbol{X}=[-2.94,0,0,336.66,0,0,15,0,0,20,20,20]^{\mathrm{T}}+[0.05,0,0,0.05,0,0,0.5,0.5,0.5,-10,-10,-10]^{\mathrm{T}}$,其中 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{t}}$ 为初始时刻的状态真值.

3.2 仿真结果及分析

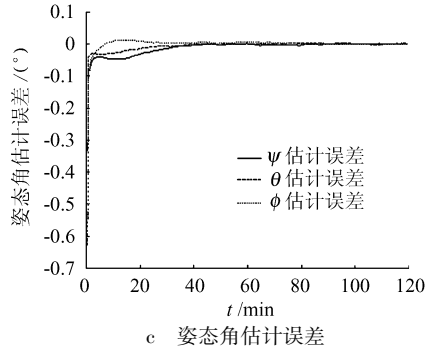
图2为在上述仿真条件下月球车使用 UKF 滤波方法进行天文导航定姿的结果. 从仿真结果可以看出,在上述仿真条件下,使用该方法的月球车天文导航的平均位置精度约为 200 m,速度的平均估计精度为 10 m/s,姿态的平均估计精度为 0.01°,陀螺常值漂移的平均估计精度为 0.5°/h.



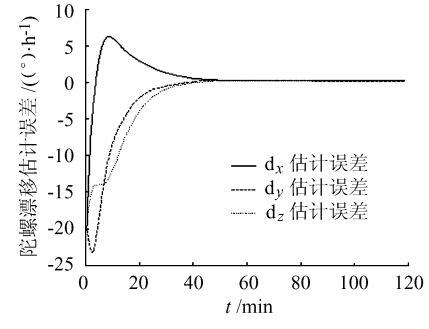
a　位置估计误差



b　速度估计误差



c　姿态角估计误差



d　陀螺漂移估计误差

图 2　月球车天文导航定姿结果

当月球车静止不动时,姿态模型中可去掉陀螺的输入,此时的估计精度完全取决于天体敏感器的精度,在上述仿真条件下位置精度可达 50 m 以内,姿态估计精度约为 2.5″. 本文提出的方法的实质是利用高精度的天体敏感器的观测信息,通过滤波估计获得姿态信息,从而间接获得天体真高度的信息,再进一步获得位置信息. 因此,与文献[2-3]中 E. Krotkov 提出的利用倾角计和天体敏感器直接获得天体真高度进行定位的方法比,由于不再使用低精度倾角计(精度约 0.2°)而仅是利用高精度天体敏感器(10″)的量测信息,因此定位精度有了很大提高. 表 1 为在上述仿真条件下,分别采用这两种方法的导航系统的计算机仿真结果比较表.

表 1　结果比较表

导航方法	位置估计误差/km	速度估计误差/(m·s^{-1})
E. Krotkov 的方法	0.977 1	150
本文的方法	0.129 4	8.5

当月球车运动时,由于姿态的估计精度主要取决于陀螺的随机噪声,因此随着陀螺精度的不同,估计误差也随之变化. 而且从该方法的原理可以看出,在该方法中位置和姿态估计具有耦合关系,因此姿态的估计精度也间接决定了位置的估计精度,低精度的陀螺输入会带来较大系统姿态模型的误差,使得姿态、位置的估计精度较低. 并且由于姿态和位置的耦合关系,滤波器的状态初值与真值之差不宜过大,且最好同时观测 3 颗或以上的天体,以保证滤波器收敛到正确的状态值.

4　结 束 语

本文研究了一种利用天体敏感器测量得到的天体高度和方位作为观测信息,结合月球车运动的当前统计模型和姿态的欧拉角运动学模型,利用 UKF 方法获得高精度月球车实时位置、速度和姿态信息的导航方法,并通过计算机仿真验证了该方法的有效性. 该方法的特点是仅需利用天体高度和方位的观测值,即可同时给出月球车的位置和姿态信息,因此易于实现,成本较低. 但该方法也存在不足之处,例如姿态和位置之间的相互耦合关系,使其相互影响等. 如何通过增加其他传感器,如加速度计、倾角计等的测量信息,解除姿态和位置之间的相互耦合关系,以及通过改进滤波算法增加系统的鲁棒性和可靠性等仍是值得深入研究的问题. 另外当观测量不足 3 颗时的导航定姿问题也是需要进一步解决的问题.

参考文献(References)

[1] Benjamin P M. Celestial navigation on the surface of mars[R]. ADA392455,2001

[2] Krotkov E, Hebert M, Buffa M, et al. Stereo driving and position estimation for autonomous planetary rovers[C]// Proc IARP Workshop on Robotics in Space. Montreal Canada:[s. n.], 1994

(下转第 787 页)