

月面巡视探测器路径规划性能评估算法

殷礼明¹, 贾 阳²

(1. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要:通过分析月面巡视探测器路径规划性能对算法进行评估,提出路径规划算法性能的量化评估函数,并经过实验验证评估函数的可行性。针对巡视探测器常用的两种全局规划算法和两种局部规划算法,通过评估函数的理论分析和实验验证得到更适应于月面巡视探测的路径规划搜索算法。这种评估算法路径规划性能的量化评估函数,不仅可行而且具有通用性,同样适用于其他的路径规划搜索算法。

关键词:航天器结构与设计;月面巡视探测器;路径规划;算法评估

中图分类号:V44 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)04-0996-05

Algorithm evaluation for lunar rover path-planning

YIN Li-ming¹, JIA Yang²

(1. Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In this paper the performance of the algorithm for lunar rover path-planning is evaluated, and a quantified evaluating function for the performance of the path-planning algorithm was proposed. The feasibility of the evaluating function was verified by experiments. Two commonly used global planning algorithms and two local planning algorithms were taken into consideration, and the search algorithm which is more adaptive for lunar exploration was identified by theoretical analysis using the evaluating function and by experiments. It is demonstrated that the proposed quantified evaluating function for the performance of path planning algorithm is not only feasible but also universal, which could be adaptable in evaluating other path planning algorithms.

Key words:spacecraft structure and design; lunar rover; path planning; algorithm evaluation

21世纪是人类进行太阳系空间探测的时代,月球是深空探测的前哨站和转运站,是人类探索宇宙、进行深空探测的重要基础,我国已将嫦娥计划列入未来重点支持计划^[1]。未来的探测任务需要巡视探测器具有更强的智能和自主性,GNC(Guide, Navigation and Control)技术是月面巡视探测技术的核心技术之一,而路径规划是月面巡视探测器GNC系统的重要组成部分,直接关

系到探测器的工作效率和安全性,也是其自主性的重要标志。国外巡视探测器的路径规划,大都采用全局路径规划或遥操作与局部路径规划或局部避障结合的工作方式,全局路径规划结合局部路径规划的自主模式已经得到初步运用,是未来月面巡视探测器GNC系统的主要发展方向^[2]。国内针对行星探测器路径规划的研究尚少,且多偏重理论仿真,如居鹤华等^[3]提出的行为控制月

收稿日期:2007-03-13.

基金项目:国防科工委民用航天项目(Y-MY-XX-00-04).

作者简介:殷礼明(1962-),男,研究员.研究方向:飞行器总体设计. E-mail:nanshan1919@sina.com

球车路径规划方法和姚沁等^[4]提出的基于虚拟传感器的双向全路径规划方法和降维法。

国内外提出了很多巡视探测器路径规划的搜索算法,但针对月面巡视探测实际应用的很少。作者根据月面环境及巡视探测器的工作特点,基于巡视探测器路径规划性能建立一种搜索算法的评估方法,对巡视探测器常用的几种全局路径规划算法和局部路径规划算法进行评估。根据评估结果和不同算法的优缺点,得到达到月面巡视探测器路径规划性能指标的路径规划算法。

1 评估标准

一般对算法主要从两方面进行评估:正特性和负特性。正特性主要指算法对执行环境的适应性及执行的稳定性;负特性主要指算法效率即算法的时间复杂性和空间复杂性。评估方法有分析法和实验法,即从理论分析和实验验证两方面对算法的特性进行评估。

评估标准应用到路径规划搜索算法上,要通过探测器路径规划性能具体体现。全局规划通过桅杆导航相机拍摄图像获取的DEM地形环境分辨率较低、信息相对简单且精确性不高,故规划路径应最优——无论空旷还是障碍物密布都能规划出安全的最短路径。巡视探测器只能靠自身环境进行建模和航位推算,而不能借助外部导航和标定系统,路径规划过程具有动态性和不完整性,故要求规划过程中的累计误差可控;全局规划算法效率通过算法的执行时间和占用空间体现,高效算法执行时间较短、搜索栅格节点较少。局部规划通过前后导航相机拍摄图像可获得较精确的高分辨率DEM地形图,环境信息相对复杂(障碍物零星密布),故路径规划系统应在任何条件下都可规划出安全路径——准确、安全地避开障碍物。局部规划修正全局路径的主要目的在于避障,在高分辨率的环境下应使误差最小并尽量消除误差;局部规划算法效率同样通过算法的执行时间和占用空间体现,局部规划系统需要实时响应传感器信息,算法执行时间就显得更为重要。

根据路径规划性能,提出如下量化评估函数

$$F = f(c, d, s, e, t, v) = k_1 c + k_2 d + k_3 s + k_4 e + k_5 t + k_6 v$$

式中: c 为路径优化参数; d 为路径长度参数; s 为路径安全参数; e 为规划误差参数; t 为规划时间参数; v 为规划空间参数; $k_1 \sim k_6$ 为性能系数,其

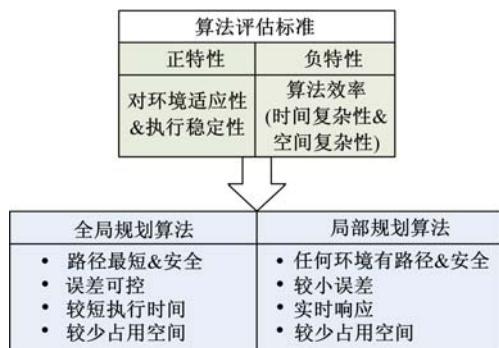


图1 路径规划算法评估标准

Fig. 1 Evaluate standard for path planning algorithm

中 c, s 为正增长参数, d, e, t, v 为负增长参数。单项性能最好,算法的该项性能参数取量化标准值1,其余算法该项性能参数通过与标准性能比较给出。性能系数体现其对应性能参数对评估函数的影响,有 $\sum_{i=1}^6 k_i = 1$ 。根据上述路径规划性能分析给出如下性能系数经验值:

全局规划: $k_1 = 0.15, k_2 = 0.3, k_3 = 0.3, k_4 = 0.05, k_5 = 0.1, k_6 = 0.1$ 。

局部规划: $k_1 = 0.2, k_2 = 0.1, k_3 = 0.35, k_4 = 0.15, k_5 = 0.15, k_6 = 0.05$ 。

2 算法分析

2.1 算法介绍

月面巡视探测器路径规划性能评估,主要针对巡视探测器使用较多的两种全局规划算法——D*算法、遗传算法和两种局部规划算法——人工势场法、Morphin算法。

全局路径规划环境为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 月面,获得分辨率 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的DEM图(分辨率由相机性能决定,通过改变栅格数来调整),栅格地形由栅格适宜度表示(范围 $0 \sim 1$);局部路径规划环境为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 月面,获得分辨率 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的DEM图,栅格地形由栅格适宜度表示(范围 $0 \sim 1$)。路径规划算法的多维搜索通过约束条件来体现,月面巡视探测的约束条件如下:路径最优/短、路径安全、路径平滑和最佳状态。

2.2 全局规划算法评估

D*算法即动态A*,先由A*进行一次规划,在执行过程中任何状态转换或成本改变,就会强制进行A*规划。估价函数确定搜索方向,这里采用曼哈顿算子得到最优路径;检测搜索节点周围栅格适宜度,确保路径安全性;在搜索过程中避

免路径出现锯齿;时间轴主要影响探测器的能源获得和通讯,探测器在行驶过程中要保持最佳状态,如图2所示。遗传算法采用概率的变迁规则来指导搜索方向,搜索过程是从一组解迭代到另一组解,同时处理群体中多个个体。搜索的初始群体点尽可能离理论最短距离(起始点与目标点

连线)点最近,实现最短路径;确定初始点和优化节点时避开障碍物得到安全路径;通过有限次迭代的遗传操作修正路径节点,实现路径最短和平滑;时间轴主要影响探测器的能源获得和通讯,探测器在行驶过程中要保持最佳状态,如图3所示。

D^* 算法的搜索方式决定路径为安全的最优

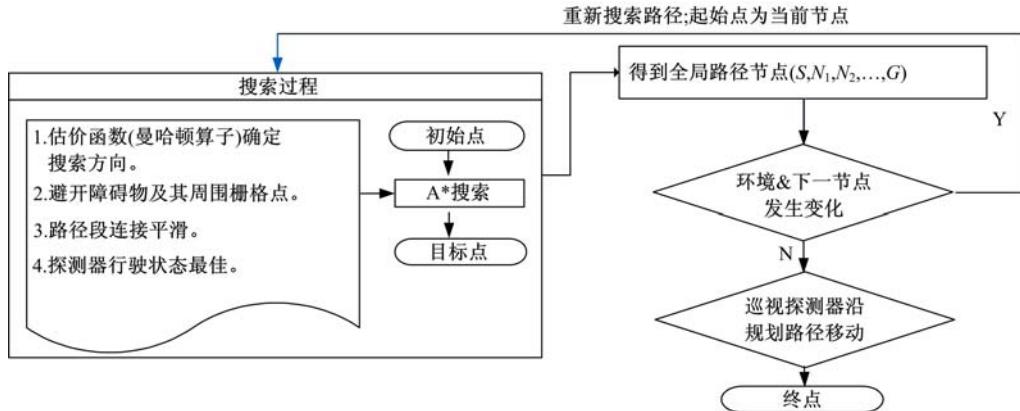


图2 D^* 算法流程

Fig. 2 Flow chart of D^* algorithm

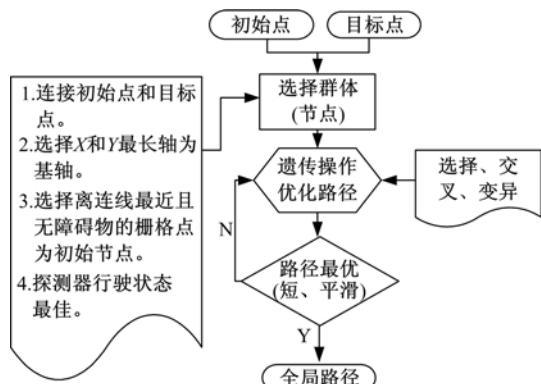


图3 遗传算法流程

Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

路径但不是最短路径,优化程度取决于估价函数的选取。栅格中心点为节点,搜索过程本身不存在误差,环境建模和航位推算误差由GNC系统定时消除。遗传算法的搜索方式和遗传操作能得到最短路径,路径的优化程度取决于迭代次数,但局部安全性(绕开障碍物)有待提高。路径选取节点为栅格中心点,路径本身不存在误差,环境建模和航位推算误差GNC系统会定时消除。表1、表2为相同环境中,分别计算5条不同类型路径的运行时间和搜索节点数,数据显示 D^* 的执行时间较长,约为遗传算法的3~4倍,搜索节点数也较多,约为遗传算法的4~5倍。

表1 全局规划算法执行时间(ms)

Table 1 Operating time of global planning algorithm ms

算法	路径1	路径2	路径3	路径4	路径5
D^* 算法	0.250	0.265	0.125	0.218	0.235
遗传算法	0.094	0.078	0.031	0.062	0.078

表2 全局规划算法搜索节点数

Table 2 Node number searched by global planning algorithm

算法	路径1	路径2	路径3	路径4	路径5
D^* 算法	284	270	94	242	249
遗传算法	52	47	22	44	46

进行量化评估函数计算前,先给出算法性能参数经验值

D^* 算法: $c=1, d=0.6, s=1, e=1, t=0.3, v=0.2$ 。

遗传算法: $c=0.6, d=1, s=0.7, e=1, t=1, v=1$ 。

因此可得如下量化评估函数

$$\begin{aligned} F_{D^*} = f_{D^*}(c, d, s, e, t, v) = \\ 0.15 \times 1 + 0.3 \times 0.6 + 0.3 \times 1 + \\ 0.05 \times 1 + 0.1 \times 3 + 0.1 \times 0.2 = 0.73 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{GA} = f_{GA}(c, d, s, e, t, v) = \\ 0.15 \times 0.61 + 0.3 \times 1 + 0.3 \times 0.7 + \\ 0.05 \times 1 + 0.1 \times 3 + 0.1 \times 1 = 0.85 \end{aligned}$$

从量化评估函数结果来看,遗传算法的路径规划性能优于 D^* 算法。

从图 4 的搜索结果来看(图中阴影部分为障碍物,打叉部分为动态障碍物), A^* 搜索路径(Path- A^*)为栅格中心点连接、转弯角度 45°,可较好地避开障碍物,但与遗传算法路径(Path-GA)相比不是最短,走了冤枉路;D* 搜索(Path-D*)适应变化的 DEM 地形图,部分实现了局部路径规划的功能,但动态规划也使路径更加绕弯;搜索时间和搜索节点数都较遗传算法多。遗传算法中通过遗传操作优化路径,在障碍物密度不大时搜索结果较理想为最短路径,障碍物较多时,转弯处容易局部碰触障碍物边缘(如图 4 中 A 点),但可通过局部路径规划修正,而且路径节点不是严格的栅格中心点,路段长度不等且转弯角度不定;搜索时间和搜索节点数都较 D* 算法少。遗传算法具有路径最短和较高的效率,若再进一步提高其路径安全性,就能达到全局路径规划对搜索算法的要求,适合作为全局路径规划搜索算法。

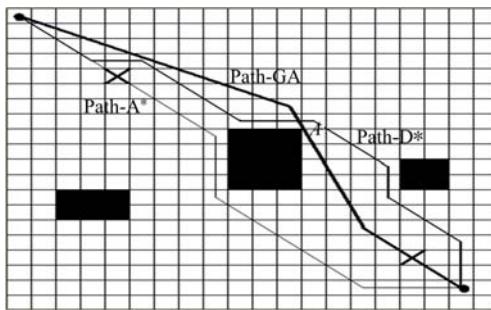


图 4 全局规划算法搜索路径

Fig. 4 Paths searched by global planning algorithms

2.3 局部规划算法评估

人工势场法将环境中的运动视为一种虚拟人工受力场中的运动,障碍物产生斥力,目标点产生引力,引力和斥力周围由一定的算法产生相应的势,势场引导探测器绕过障碍物到达目标点。搜索方向由伪势场(当前结点到终点/目标点的势场与当前结点受到障碍物势场差)及相对斜率确定,实现最优路径搜索(调整系数,避免出现局部最优解和死锁);局部规划安全通过的范围设定为 1 m × 1 m,在搜索过程中,检测节点周围 5×5 栅格是否为安全落脚点;相对斜率考虑了路径平滑性,即在给定搜索方向时部分考虑路径平滑性影响;时间轴主要影响探测器的能源获得和通讯,探测器在行驶过程中要保持最佳状态(见图 5)。

Morphin 算法实质是通过对探测器局部地形进行统计分析,确定适宜行进的路径,同全局规划算法结合,共同决策巡视探测器的底层运动行为。

根据局部目标节点的方向及栅格适宜图确定搜索方向,实现最优路径(方向最优);设定安全通过的栅格范围为 5×2 或 5×5 三角区域(保证宽度达到 1 m),检测每个备选方向包含的 20 个栅格,实现路径安全;时间轴主要影响探测器的能源获得和通讯,探测器在行驶过程中要保持最佳状态,如图 6 所示。

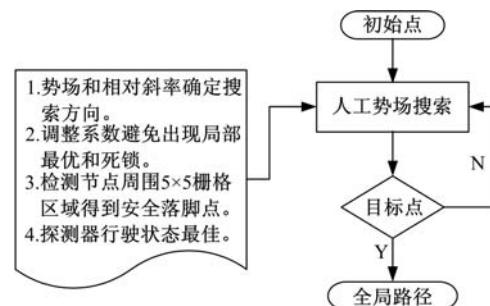


图 5 人工势场法流程

Fig. 5 Flow chart of artificial potential field approach

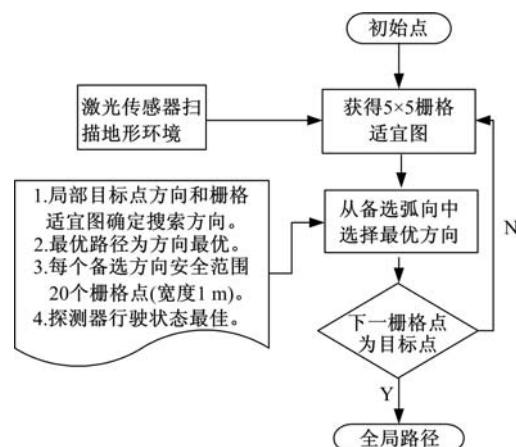


图 6 Morphin 算法流程

Fig. 6 Flow chart of Morphin algorithm

人工势场法得到的路径可成功、安全避开障碍物,但不是最优或最短路径,且可能出现局部最优解或死锁;理论算法在牺牲路径最优或最短的前提下可实现避障的准确性,避障传感器误差对算法生成路径的影响及航位推算误差可由 GNC 系统定时消除。

Morphin 算法来自适宜图的最优方向辨识,能较好地避开障碍物,不会出现走死现象,但没有考虑路径优化;算法能较好地处理来自环境建模的不确定性(如立体视觉得到的三维地形图、激光测距仪的误差等)和定位误差,航位推算误差,它们由 GNC 系统定时消除。表 3 和表 4 为相同环境中,计算 5 条不同类型相似路径的运行时间和

搜索节点数,人工势场法执行时间较长,约为 Morphin 算法的 3~4 倍,但搜索节点数仅为 Morphin 算法的 1/3~1/4。

表 3 局部规划算法执行时间

Table 3 Operating time of local planning algorithm ms

算法	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5
Force 算法	0.469	0.296	0.468	0.516	0.484
Morphin 算法	0.109	0.110	0.110	0.141	0.141

表 4 局部规划算法搜索节点数

Table 4 Node number searched by local planning algorithm

算法	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5
Force 算法	233	143	243	257	238
Morphin 算法	701	676	626	901	901

进行量化评估函数计算前,先给出算法性能参数经验值

人工势场法: $c=0.7, d=1, s=1, e=1, t=0.3, v=1$ 。

Morphin 算法: $c=1, d=0.6, s=1, e=1, t=1, v=0.3$ 。

因此可得如下量化评估函数

$$\begin{aligned} F_F &= f_F(c, d, s, e, t, v) = \\ &0.2 \times 0.7 + 0.1 \times 1 + 0.35 \times 1 + \\ &0.15 \times 1 + 0.15 \times 0.3 + 0.05 \times 1 = 0.835 \\ F_M &= f_M(c, d, s, e, t, v) = \\ &0.2 \times 1 + 0.1 \times 0.6 + 0.35 \times 1 + \\ &0.15 \times 1 + 0.15 \times 1 + 0.05 \times 0.3 = 0.925 \end{aligned}$$

从量化评估函数结果来看,Morphin 算法的路径规划性能优于人工势场法。

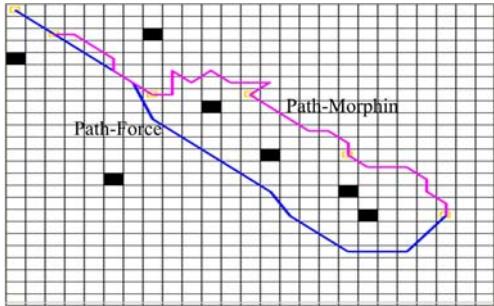


图 7 局部规划算法搜索路径

Fig. 7 Paths searched by local planning algorithms

从图 7 的搜索结果来看,人工势场法的安全性约束条件,有时会导致无法找到路径和降低搜索效率的矛盾,但路径光滑度很好;适用于障碍物密度较小的情况,密度较大同样可能找不到路径;搜索时间较长但搜索节点数较少。Morphin 算法

的搜索为无障碍最优方向,但路径安全性制约了平滑性及其优化,因此路径不够平滑、转弯较多;能很好地避开障碍物并趋向目标节点,可适合于障碍物较密区域;搜索时间短实时反应能力强,但搜索节点较多。故 Morphin 算法的安全搜索、实时避障和对环境的高适应性,能达到局部路径规划对搜索算法的要求,适合作为局部路径规划搜索算法。

3 结束语

通过分析月面巡视探测器路径规划性能和算法,以月面巡视探测的路径规划性能为指标,由量化评估函数判断算法的优劣。同时通过算法的实验分析验证了该评估方法,理论分析与实验验证结果基本一致,进而得到一种可适用于月面巡视探测器路径规划算法的评估方法。从路径规划性能和算法分析看,这种评估方法同样可用于其他算法;且栅格数取决于规划环境和分辨率,不会无限度增加,从路径规划结果看,增加部分栅格不会影响评估结果。

参考文献:

- [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3):351-358.
Ouyang Zi-yuan. Scientific objectives of chines lunar exploration project and development strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3):351-358.
- [2] 胡明, 邓宗全, 王少纯, 等. 月球探测车移动系统的关键技术分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(7): 795-798.
Hu Ming, Deng Zong-quan, Wang Shao-chun, et al. Key technologies for lunar rover locomotive system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35 (7):795-798.
- [3] 居鹤华, 崔平远, 崔祐涛, 等. 行为控制月球车路径规划技术[J]. 自动化学报, 2004, 30(4):572-577.
Ju He-hua, Cui Ping-yuan, Cui Hu-tao, et al. Autonomous behavior path planning for lunar rover[J]. ACTA Automatica Sinica, 2004, 30(4):572-577.
- [4] 姚沁, 祝捷, 陈建平, 等. 五轮铰接式月球机器人的全局路径规划[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35 (12):1785-1788.
Yao Qin, Zhu Jie, Chen Jian-ping, et al. Global path planning for five-wheel articulated lunar robot[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35 (12): 1785-1788.