

基于自主行为智能体的月球车运动 规划与控制¹⁾

居鹤华 崔平远 刘红云

(北京工业大学电控学院 北京 100022)
(E-mail: juhehua@163.com)

摘 要 研究基于自主行为智能体的月球车运动规划与控制方法. 在基于自主行为智能体的月球车系统结构基础上, 首先设计了月球车运动规划与控制的一组基本行为, 对其原理进行证明. 通过行为状态机对行为进行选择, 如果不能保障月球车安全性能, 则由运动规划智能体学习其行为参数, 并由神经网络记忆. 将月球车运动规划与控制分解为行为设计与学习两个过程, 使月球车控制系统易于加入先验知识. 同时, 月球车运动规划能够满足其机动性与地形传递性约束, 保证工程开发的结构化与可实现性. 该方法不仅具有实时性, 而且对未知环境具有较强的适应能力. 仿真研究与实验证明了该方法的有效性.

关键词 月球漫游车, 自主行为智能体, 运动规划, 运动控制
中图分类号 TP18

Autonomous Behavior Agent-Based Lunar Rover Motion Planning and Control

JU He-Hua CUI Ping-Yuan LIU Hong-Yun

(School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022)
(E-mail: juhehua@163.com)

Abstract An approach based on autonomous behavior agent of lunar rover motion planning and controlling is presented. First, based on the autonomous behavior agent, a group of behaviors is designed, and its theory is proven. Then, a behavior automata is used for behavior coordination. When the motion planning cannot guarantee the rover safety, a motion planning agent is invoked to learn behavior parameters, which are then memorized by a neural network. At the same time, the rover behaviors can meet both constraints of rover maneuverability and lunar terrain transferability. The approach can timely plan and control the rover in an unknown world. Simulation and experiment results are shown to demonstrate the effectiveness of the approach.

Key words Lunar rover, autonomous behavior agent, motion planning, motion control

1 引言

月球车运动规划与控制的^{最大}特点是月面地形的非结构化, 即地形不能用清晰的模型来表示, 因而也自然产生两大类型的运动规划方法^[1]: 一是模型化的方法, 即先将非结构

1) 国家自然科学基金 (60374067) 及北京市科技发展计划项目 (Km200510005018) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60374067) and Science and Technology Development Plan of Beijing (Km200510005018)
收稿日期 2004-6-14 收修改稿日期 2006-4-26
Received June 14, 2004; in revised form April 26, 2006

化的环境用近似的模型来描述,然后再用基于模型的优化方法来解决.基于物理的规划方法^[2,3]、基于计算几何的规划方法^[4~6]、基于人工势场的规划方法^[7]就属这一类;二是基于非模型化的方法,即不需要清楚的环境模型,直接运用数值优化的方法来解决.基于遗传算法的优化方法^[8]、行为控制方法或基于传感器的方法^[9,10]就是这一类.文献[11,12]研究了在行为控制中如何加入先验知识及通过学习来提高机器人的行为问题.由于自然地形是非结构化的,人为得到环境的近似模型,必然导致巨大的计算代价.其一是由于建模本身就是一个复杂的优化问题.其次,由于计算几何方法难以加入先验知识^[3~9],对于简单问题进行优化也要对所有环境作细致的计算才能得出结论.遗传算法、神经网络只能对特定环境具有比较成功的应用.同时,人工势场必须运用数值优化方法,为了得到最优解不得不采用遗传算法等随机优化算法,导致结果具有不确定性、计算过程缺乏实时性^[3~6].它们在仿生学上只具有一定的合理性,试图用少数几个、甚至一个指标函数来统一描述具有无穷模式的自然地形,也就是把在自然地形运行的机器人的运动规划智能归结为一类或几类函数,从而把复杂的人工智能简单化.对于非结构化、具有无穷模式的运动规划问题应该运用基于知识的方法才能与月球车运动规划问题相匹配.因而,有必要研究根据不同地形特点进行运动规划的方法.

基于自主行为智能体的月球车运动规划与控制方法通过两个方面达到目的:一方面,针对不同环境特征,比如针对平坦地形、坡面、地形质地等不同区域的地形,设计典型的月球车基本行为.另一方面,根据对规划结果的评价,学习基本行为参数,并由神经网络记忆,以便在新的环境下运用已学习到的行为参数实现月球车的控制,进一步提高运动规划与控制的适应能力.本文侧重于基本行为设计与原理证明.第2节介绍月球车系统结构.第3节对行为协调的理论依据进行证明.第4节介绍几个行为的设计过程.最后,给出仿真实验结果.

2 基于自主行为智能体的月球车系统结构

图1所示的月球车导航与控制实验样机采用六轮独立驱动,左右各两轮,前后各一轮.由6个无刷直流电机驱动、2个无刷直流电机用于方向控制.配备一副双目立体相机,用于远景观测;1个用于近景精确测绘的高速(5万点/秒)激光雷达系统;1只太阳相机及1只惯性单元用于月球车位姿确定;4只编码器用于臂形检测.计算机系统由一块400MHz的PC104主板及接口板组成,采用VxWorks实时操作系统.外设控制主要采用CAN总线.

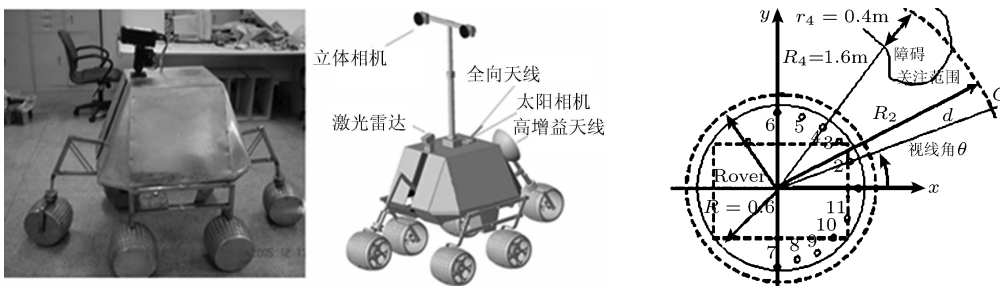


图1 月球车原理样机(左)、外形结构图(中)、月球车代理体模型(右)

Fig. 1 Lunar rover prototype (left), configuration sketch (middle), lunar rover agent model (right)

月球车机动性能由图1右侧月球车代理体模型来描述,它反映月球车几何轮廓(R_i, θ_i)、障碍距离(r_i, θ_i)、关注范围 R_k 、安全底线 R_l 、目标距离 d 与方向 θ 、平动速度区间 $[V, \bar{V}]$

及转动速度区间 $[\underline{\omega}, \bar{\omega}]$, 其他还包括越障高度与越坑宽度、月球车位姿等基本参数. 该代理体模型同时包含一组虚拟传感器、当前行为及参数等. 当月球车感知环境后, 建立环境数据库, 按月球车机动性能等进行障碍提取, 虚拟传感器与非结构化的障碍图进行交互, 从而访问结构化的环境数据库. 虚拟传感器与计算机其他设备文件一样, 以文件形式统一管理.

月球车导航与控制系统由牵引控制系统、位姿确定系统、环境感知系统、智能体系统等组成. 其中智能体系统包括运动识别分系统、路径规划分系统、运动规划与校验分系统、基本行为库、行为学习分系统等. 采用智能体的目的是, 通过智能体间的协作来提高复杂问题的优化效率. 其中两个重要问题包括: 月球车车轮与地面接触位置估计, 考虑月球车运动学与动力学及与地面作用关系时的运动规划与控制. 前者是月球车运动规划与牵引控制的前提, 也是实现最优牵引控制、发挥最优机动性能的前提. 月球车采用半自主的控制模式, 遥操作是基于任务的, 比如: 月球车驱向给定目标或一系列的站点, 而月球车如何实现这一过程完全由月球车自主地实现. 通过视觉系统建设环境数据库, 经过处理得到周围环境的障碍图. 月球车与环境作用关系由月球车代理体与环境障碍图及环境数据库交互, 从行为库中选择相应的行为, 并进行行为协调与学习, 从而产生最适应环境的运动规划, 得到运动控制命令, 然后由牵引系统伺服执行.

3 行为设计与行为协调的基本原理

3.1 基于力场的月球车代理体与环境的作用

图1中月球车代理体通过虚拟传感器得到环境的信息, 即获取障碍相对月球车的位置与方向、障碍类型等, 通过月球车的行为控制器决定月球车的平动与转动速度. 对单个虚拟传感器 (R_i, θ_i) 及其对应方向的障碍点 (r_i, θ_i) 而言, 对避障的权重为 $W_{\bar{V}_i}$ 及 $W_{\bar{\omega}_i}$, 避障行为产生的速度控制分量 $\bar{V}_i, \bar{\omega}_i$ 由下式决定

$$\bar{\omega}_{i(k)} = C_{\omega_{ob(k)}} W_{\bar{\omega}_i} (r_{i(k)} - R_{1i}) (\pi/2 - \theta_i), \quad \bar{V}_{i(k)} = C_{V_{ob(k)}} W_{\bar{V}_i} (R_{2i} - r_{i(k)}) \quad (1)$$

因采样时间很小, 故 $r_i \approx r_{i-1}$, 则有

$$\begin{aligned} d\bar{\omega}_{i(k)}/dt &= (\bar{\omega}_{i(k)} - \bar{\omega}_{i(k-1)})/T \approx \\ & [C_{\omega_{ob(k)}} W_{\bar{\omega}_i} (r_{i(k)} - R_{1i}) - C_{\omega_{ob(k-1)}} W_{\bar{\omega}_i} (r_{i(k-1)} - R_{1i})] (\pi/2 - \theta_i) / T \approx \\ & (C_{\omega_{ob(k)}} - C_{\omega_{ob(k-1)}}) (r_{i(k-1)} - R_{1i}) (\pi/2 - \theta_i) / T \end{aligned} \quad (2)$$

$$d\bar{V}_{i(k)}/dt \approx C_{V_{ob(k)}} W_{\bar{V}_i} (R_{2i} - r_{i(k-1)}) / T$$

所有虚拟传感器对避障控制产生总的速度及加速度分别为

$$\begin{aligned} \omega_{ob(k)} &= \sum_{i=1}^N \bar{\omega}_{i(k)} = C_{\omega_{ob(k)}} \sum_{i=1}^N W_{\bar{\omega}_i} (r_{i(k)} - R_{1i}) (\pi/2 - \theta_i) \\ V_{ob(k)} &= \sum_{i=1}^N \bar{V}_{i(k)} = C_{V_{ob(k)}} \sum_{i=1}^N W_{\bar{V}_i} (R_{2i} - r_{i(k)}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d\omega_{ob(k)}/dt &= (\omega_{ob(k)} - \omega_{ob(k-1)})/T \approx \\ & ((C_{\omega_{ob(k)}} - C_{\omega_{ob(k-1)}})/T) \sum_{i=1}^N W_{\bar{\omega}_i} (r_{i(k-1)} - R_{1i}) (\pi/2 - \theta_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$dV_{ob(k)}/dt \approx (C_{V_{ob(k)}}/T) \sum_{i=1}^N W_{\bar{V}_i}(R_{2i} - r_{i(k-1)})$$

定理 1. 若

$$r_{i(k)} - R_{1i} \in [0, d_1], \quad R_{2i} - r_{i(k)} \in [0, d_2] \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N W_{\bar{\omega}_i}(\pi/2 - \theta_i) = 1, \quad \sum_{i=1}^N W_{\bar{V}_i} = 1 \quad (6)$$

则有 $\sum_{i=1}^N W_{\bar{\omega}_i}(r_{i(k)} - R_{1i})(\pi/2 - \theta_i) \in [0, d_1]$, $\sum_{i=1}^N W_{\bar{V}_i}(R_{2i} - r_{i(k)}) \in [0, d_2]$. 亦即: $\omega_{ob(k)} \in C_{\omega_{ob(k)}}[0, d_1]$, $V_{ob(k)} \in C_{V_{ob(k)}}[0, d_2]$, $d(\omega_{ob(k)})/dt \in (C_{\omega_{ob(k)}} - C_{\omega_{ob(k-1)}}/T)[0, d_1]$, $dV_{ob(k)}/dt \in (C_{V_{ob(k)}}/T)[0, d_2]$.

证明. 因凸集中有限个元素的凸组合仍属该凸集, 结果显然. \square

其对应的曲率为

$$\rho_{ob(k)} = (C_{\omega_{ob(k)}}/C_{V_{ob(k)}}) \sum_{i=1}^N W_{\bar{\omega}_i}(r_{i(k)} - R_{1i})(\pi/2 - \theta_i) / \sum_{i=1}^N W_{\bar{V}_i}(R_{2i} - r_{i(k)}) \quad (7)$$

给定目标 (X_G, Y_G) 时, 对目标趋向行为产生的控制分量由下式确定

$$\omega_{G(k)} = C_{\omega_{G(k)}}\theta_{G(k)}, \quad V_{G(k)} = C_{V_{G(k)}}R_{G(k)} \quad (8)$$

则转动加速度为

$$d\omega_{G(k)}/dt \approx (C_{\omega_{G(k)}} - C_{\omega_{G(k-1)}})\theta_{G(k-1)}/T \quad (9)$$

平动转动加速度为

$$dV_{G(k)}/dt \approx (C_{V_{G(k)}} - C_{V_{G(k-1)}})R_{G(k-1)}/T$$

其对应曲率为

$$\rho_{G(k)} = (C_{\omega_{G(k)}}/C_{V_{G(k)}})\theta_{G(k)}R_{G(k)} \quad (10)$$

其中 $C_{\omega_{ob(k)}}, C_{V_{ob(k)}}, C_{\omega_{G(k)}}, C_{V_{G(k)}}$ 为避障行为及目标趋向行为输出调节系数, 它们决定着月球车的速度、加速度、转向曲率, 泥土特性、月球车机动性能约束. $W_{\bar{\omega}_i}, W_{\bar{V}_i}$ 是根据各虚拟传感器在避障行为控制中的权重.

由定理 1 可知, 月球车避障运动速度由 (1) 式确定, 且行为协调准则由式 (5)、(6) 确定, 则避障运动速度、加速度由 $C_{\omega_{ob(k)}}, C_{V_{ob(k)}}$ 唯一确定. 同理, 月球车趋向目标行为的速度及加速度由 $C_{\omega_{G(k)}}, C_{V_{G(k)}}$ 唯一确定.

上述分析过程为月球车行为设计、行为协调与学习满足月球车机动性能约束即月球车速度、加速度约束提供了理论基础, 可以减小运动规划搜索空间, 提高运动规划速度.

3.2 基于混杂控制的行为自动机

下面, 根据混杂控制系统基本理论, 对月球车行为控制基本概念进行定义, 以使月球车行为控制过程具有理论基础. 月球车行为与月球车状态及环境状态具有一一对应关系, 因而月球车行为本质上由以离散事件为条件的速度场来确定.

定义 1. 确定性行为 B_i : 当环境状态 Q_i 及行为内部状态 X_i 得到满足时, 行为控制器产生作用于环境及内部状态的实时控制过程. 其表示为一个七元组 $S_i = (Q_i, X_i, I_i, f_i, P_i, U_i, Q_i)$. 一个行为就是一个具有应激性的动态响应过程. 其中: Q_i 为事件状态; X_i 为行为内部状态; I_i

为初始状态; f_i 为行为动态系统, 指行为控制输入与输出满足的运动规律, 即 $\dot{X}_i = f_i(X_i, U_i)$, 是 Lipschitz 连续系统; P_i 为行为参数; U_i 为行为输入; Q_i 为行为输出.

定义 2. 确定行为自动机 B : 由一组行为构成的行为系统网络, 事件状态决定行为是否激发, 行为动态过程决定行为状态的演变过程.

由于行为动态过程是 Lipschitz 连续系统, 因此该行为状态存在唯一. 同时, 由于行为是应激性的动态过程, 因而, 其响应时间对于月球车动力学与运动学过程可视为无穷小.

定义 3. 确定齐诺行为: 两确定行为 B_i 与 B_j 在有限时间内实现无穷次切换而突现的行为.

定理 2. 若确定齐诺行为 B_z 由两个基本行为 B_i, B_j 的行为动态系统 $f_i \in R^n, f_j \in R^n$ 共同决定, 且满足向量场求和运算法则, 则该齐诺行为动态过程可表示为

$$\dot{X}_{z(t)} = \alpha_{(t)} f_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) + (I - \alpha_{(t)}) f_j(X_{j(t)}, U_{j(t)})$$

即该齐诺行为由两确定行为的速度场的超平面确定. 其中 $\alpha_{(t)} \in \text{diag}(\alpha_{1(t)}, \alpha_{2(t)}, \dots, \alpha_{n(t)})$, $\alpha_{i(t)} \in [0, 1], i = [1, 2, \dots, n]$.

证明. 在 $X_{z(t)} \in R^n$ 的邻域 O_r^n (半径为 r 的开超球体, r 为无限小量), 对于两个基本确定行为 B_i, B_j 的行为动态系统, 因是 Lipschitz 连续系统, 则 $X_{i(t)}, X_{j(t)}$ 及 $f_i(X_{z(t)}, U_{i(t)}), f_j(X_{z(t)}, U_{j(t)})$ 存在, 且对应的速度场分别为 $f_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}), f_j(X_{j(t)}, U_{j(t)})$, 若 $f_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}), f_j(X_{j(t)}, U_{j(t)})$ 是线性无关的, 则在 O_r^n 内的任一速度矢量可表示为此两速度矢量的凸组合: $\dot{X}_{z(t)} = \alpha_{(t)} f_i(X_{z(t)}, U_{i(t)}) + (1 - \alpha_{(t)}) f_j(X_{z(t)}, U_{j(t)})$ (同一凸集的凸组合仍属该凸集), 其中, $\alpha_{(t)} \in \text{diag}(\alpha_{1(t)}, \alpha_{2(t)}, \dots, \alpha_{n(t)})$, $\alpha_{i(t)} \in [0, 1], i = [1, 2, \dots, n]$, 且 $\dot{X}_{z(t)} \in O_r^n$. \square

定理 3. 对于确定齐诺行为 B_z , 若对于 $X_{z(t)}$, 且两个基本确定行为 B_i, B_j 的行为动态系统 $\dot{X}_{i(t)} \in [a_-, a_+]^n, \dot{X}_{j(t)} \in [a_-, a_+]^n, \dot{X}_{i(t)} \in [b_-, b_+]^n, \dot{X}_{j(t)} \in [b_-, b_+]^n, \|f_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) - f_j(X_{j(t)}, U_{j(t)})\| \leq Q, \|\dot{\alpha}_{(t)}\| \leq \rho$ 则对由此两个基本确定行为突现的确定齐诺行为 B_z , 满足 $X_{z(t)} \in [a_-, a_+]^n, \dot{X}_{z(t)} \in [b_- - \rho Q, b_+ + \rho Q]^n$.

证明. 取 $X_{z(t)} \in O_r^n$ (半径为 r 的开超球体, r 为无限小量), 因 $\dot{X}_{i(t)} \in [a_-, a_+]^n, \dot{X}_{j(t)} \in [a_-, a_+]^n, \ddot{X}_{i(t)} \in [b_-, b_+]^n, \ddot{X}_{j(t)} \in [b_-, b_+]^n$ 为凸集, 由定理 1 知:

$$\dot{X}_{z(t)} = \alpha_{(t)} f_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) + (1 - \alpha_{(t)}) f_j(X_{j(t)}, U_{j(t)})$$

其中 $\alpha_{(t)} \in \text{diag}(\alpha_{1(t)}, \alpha_{2(t)}, \dots, \alpha_{n(t)})$, $\alpha_{i(t)} \in [0, 1], i = [1, 2, \dots, n]$, 且 $\dot{X}_{z(t)} \in O_r^n$. 则 $X_{z(t)} \in [a_-, a_+]^n$ (同一凸集的凸组合仍属该凸集). 由 (9) 式得:

$$\|\dot{X}_{z(t)}\| = \|\alpha_{(t)} \dot{f}_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) + (1 - \alpha_{(t)}) \dot{f}_j(X_{j(t)}, U_{j(t)}) + \dot{\alpha}_{(t)} (f_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) - f_j(X_{j(t)}, U_{j(t)}))\| \leq \|\alpha_{(t)} \dot{f}_i(X_{i(t)}, U_{i(t)})\| + \|(1 - \alpha_{(t)}) \dot{f}_j(X_{j(t)}, U_{j(t)})\| + \rho Q \leq b_+^n + \rho Q$$

$$\|\dot{X}_{z(t)}\| = \|\alpha_{(t)} \dot{f}_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) + (1 - \alpha_{(t)}) \dot{f}_j(X_{j(t)}, U_{j(t)}) + \dot{\alpha}_{(t)} (f_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) - f_j(X_{j(t)}, U_{j(t)}))\| \geq \|\alpha_{(t)} \dot{f}_i(X_{i(t)}, U_{i(t)}) + (1 - \alpha_{(t)}) \dot{f}_j(X_{j(t)}, U_{j(t)})\| - \rho Q \geq b_-^n - \rho Q$$

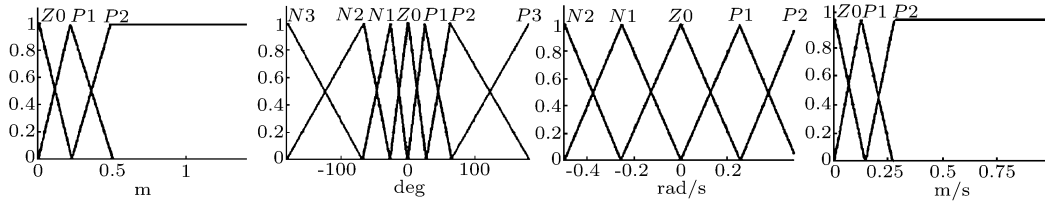
所以 $\dot{X}_{z(t)} \in [b_- - \rho Q, b_+ + \rho Q]^n$. \square

定理 2、3 为目标趋向的避障行为设计过程奠定了理论基础, 只要选择适当小的迭代系数 ρ , 就能通过行为输出调节系数 $C_{\omega ob(k)}, C_{V ob(k)}, C_{\omega G(k)}, G_{VG(k)}$ 使该行为的月球车运动速度、加速度满足有界性约束. 当行为协调系数为常值时, 月球车速度及加速度的有界性自然满足.

4 基本行为设计

4.1 目标趋向行为

以月球车几何中心至目标的距离 d 、月球车前进方向与视线的夹角 θ 即视线角为输入, 以月球车前进速度 V_1 、转动速度 ω_1 为输出变量. 目标趋向行为的语言变量及隶属度函数如图 2 所示. 模糊规则如下:



(a) 目标距离 d 的隶属函数 (b) 目标方向 θ 的隶属函数 (c) 转动速度 ω_1 的隶属函数 (d) 平动速度 V_1 的隶属函数

图 2 目标趋向行为控制器

Fig. 2 Controller of goal-oriented behavior

如果 d 为 $P2$, 则 V_1 为 $P2$; 如果 d 为 $P1$, 则 V_1 为 $P1$; 如果 d 为 $Z0$, 则 V_1 为 $Z0$;
 如果 θ 为 $N3$, 则 ω_1 为 $N2$; 如果 θ 为 $N2$, 则 ω_1 为 $N2$; 如果 θ 为 $N1$, 则 ω_1 为 $N1$;
 如果 θ 为 $Z0$, 则 ω_1 为 $Z0$; 如果 θ 为 $P1$, 则 ω_1 为 $P1$; 如果 θ 为 $P2$, 则 ω_1 为 $P2$;
 如果 θ 为 $P3$, 则 ω_1 为 $P2$.

上述规则满足“与”关系, 解模糊运用面积中心法.

在月球车执行目标趋向行为过程中, 前 3 个规则保证离目标很远时按正常速度行驶, 接近目标时开始减速, 到达目标时则停止. 后 6 个规则使月球车前进方向调整至视线方向.

当利用模糊控制实现该行为时, 使输入输出呈分段线性关系, 对通过调整基本行为参数来规划适合月球车机动性的行为输出非常重要. 由于这些约束多数是依赖于地形质地及任务要求, 因而按一定粒度建立地形力学特性参数、控制任务与隶属度函数参数之间的关系表是一个比较实用的方法. 并且, 根据地形质地、控制任务、月球车平动及转动速度要求自适应调整隶属度参数以满足当地地形传送性约束条件.

4.2 避障行为

避障行为以障碍入侵月球车安全线的径向距离 $[r_1, r_2, \dots, r_{11}]$ 为输入变量, 以月球车前进速度 V_2 、转动速度 ω_2 为输出变量. 语言变量及隶属度函数如图 3 所示. 模糊规则如下:

如果 $[r_1, r_2, \dots, r_{11}]$ 都为 $Z0$, 则 V_2 为 $Z0$, ω_2 为 $N1$;
 如果 $[r_1, r_2, \dots, r_{11}]$ 都为 $P1$, 则 V_2 为 $Z0$, ω_2 为 $P1$;
 如果 r_i 为 $P2$, 则 V_2 为 $P2$, ω_2 为 $P1$ (其中 $i = 1, 2, \dots, 7$);
 如果 r_i 为 $P1$, 则 V_2 为 $P1$, ω_2 为 $P1$; 如果 r_i 为 $Z0$, 则 V_2 为 $Z0$, ω_2 为 $Z0$;
 如果 r_j 为 $P2$, 则 V_2 为 $P2$, ω_2 为 $N1$ (其中 $j = 8, 9, \dots, 11$);
 如果 r_j 为 $P1$, 则 V_2 为 $P1$, ω_2 为 $N1$; 如果 r_j 为 $Z0$, 则 V_2 为 $Z0$, ω_2 为 $Z0$.

上述规则满足“与”关系, 解模糊运用面积中心法.

在执行避障行为过程中, 前两个规则保证月球车在正对障碍时仍能以一定的速度转向, 并分别试图以正、反向转动离开障碍, 这在进入拐角形式的障碍时逃脱很重要. 后 5

个规则保证月球车障碍进入月球车安全区时总是使月球车向外侧行走. 由于避障行为是虚拟传感器对应避障行为的凸组合, 它的有界性、连续性及确定性是有保证的.

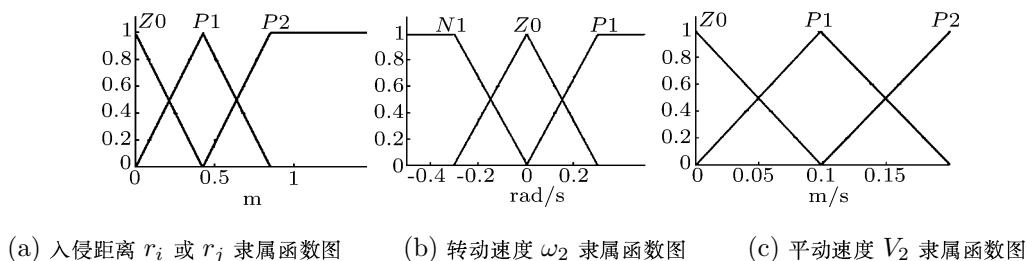


图 3 避障行为控制器

Fig. 3 Controller of obstacle avoidance behavior

4.3 趋向目标的避障行为

该行为由目标趋向行为与避障行为输出融合突现产生. 趋向目标的避障行为的输入是目标趋向行为输入 $[d, \theta]$ 及避障行为的输入 $[r_1, r_2, \dots, r_{11}]$. 趋向目标的避障行为的输出是目标趋向行为输出 $[V_1, \omega_1]$ 或避障行为的输出 $[V_2, \omega_2]$. 其协调准则是: 当月球车在关注范围内感知存在障碍时避障行为被激活, 否则目标趋向行为被激活. 在月球车关注范围内存在障碍及不存在障碍时分别激活避障行为及目标趋向行为, 二者动态平衡的结果使月球车具有平行于障碍边缘行走的功能, 并在目标与障碍相切处与障碍自动分离. 这是一个硬切换过程.

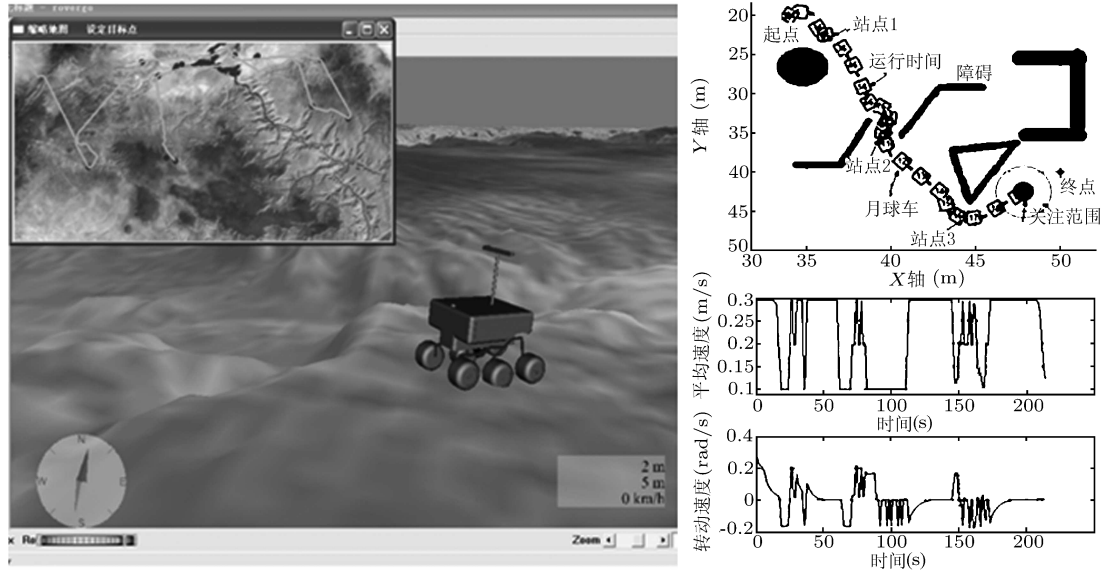
该行为是 Lipschitz 连续的, 是应极性的, 其本质是齐纳 (Zeno) 行为, 因而该行为突现结果为月球车关注范围与障碍边缘的切线相对应的几何中心轨迹. 由于两个子行为是连续的, 且突现后的行为产生的轨迹也是连续的, 因而相邻无穷小邻域内两点对应两子行为的输出速度是相等的. 趋向目标的避障行为产生的机理与滑模控制中状态向滑模面的趋近过程一样.

该行为适用于在月球车关注范围内, 且相对月球车与目标间的视线是凸的障碍, 此时月球车既能避开障碍又能向目标方向前进.

5 仿真及实验研究

基于自主行为智能体的运动规划与控制仿真如图 4 所示. 图 4(a) 是月球车在 3D 自然地形巡游过程. 操作人员指定月球车巡游过程的站点序列, 月球车自主地进行运动规划与控制. 图 4(b) 是月球车在 2D 环境下运动规划结果, 可以看出, 月球车速度及加速度是连续、有界的, 且在设计的要求范围之内. 月球车运动规划与控制过程中没有不确定性, 具有很高的实时性. 在 CPU 主频 1.8G、内存 256M 时, 进行 3D 全系统仿真, 系统更新率为 80Hz. 在 PC104+ 主频 400MHz、128M 内存、采用 VxWorks 实时操作系统时, 能够满足月球车实时运动规划与控制的要求. 通过基于任务的遥操作控制, 即给定月球车站点序列, 月球车自主地完成避障与运动规划与控制, 同时月球车也可进行局部环境的路径站点规划, 从而使月球车巡游探测效率与可靠性都得到很大程度的提高.

月球车与地形适配关系也应用了自主行为智能体方法, 一组仿真结果如图 5 所示. 它能够精确地确定月球车车轮与地面接触关系, 解决了六轮独立驱动月球车逆运动学求解问题. 同时能预报出月球车行驶过程的姿态. 它为月球车牵引控制提供车轮与地面接触点、接触角、月球车俯仰角及横滚角等基本信息.



(a) 3D 下运动规划与控制仿真

(b) 2D 下运动规划与控制仿真

图 4 自主行为智能体的运动规划与控制仿真

Fig. 4 Autonomous behavior agent based motion planning and control simulation

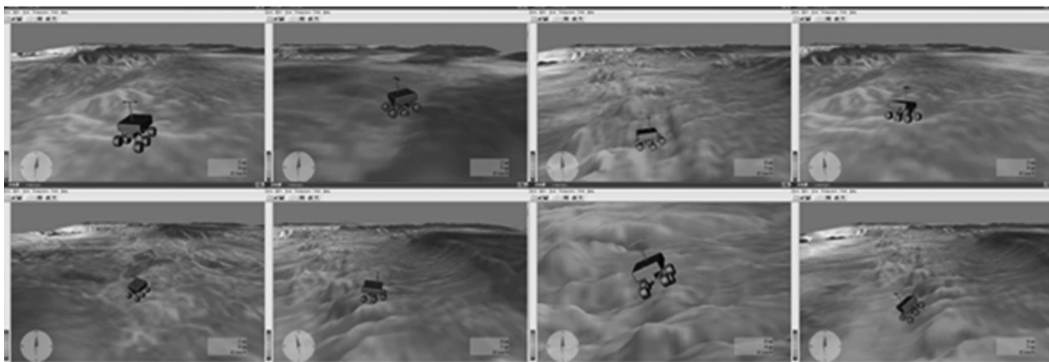


图 5 月球车地形适配仿真

Fig. 5 Snaps of lunar rover match with terrain simulation

6 结论

本文研究了基于自主行为智能体的月球车运动规划与控制方法，设计了月球车运动规划与控制的一组基本行为，对其原理进行了证明，将基于行为控制的人工智能与基于符号的人工智能有机地结合起来，不仅将行为控制方法应用于月球车的运动规划与控制当中，对未知环境具有较强的适应能力，而且运用智能体结构将月球车运动规划与控制分解为行为设计与学习两个过程，使月球车控制系统易于加入先验知识，同时使复杂的月球车运动规划与控制过程具有易于结构化，有利于月球车的研制。理论分析、仿真研究及部分实验结果证明了基于自主行为智能体的运动规划与控制方法是有效的。

References

- 1 Ju H H. Autonomous Behavior Based Motion Planning and Control for Lunar Rover. [Ph. D. Dissertation], Harbin Institute of Technology, 2003
- 2 Shane Farritor, Herve Hacoï, Steven Dubowsky. Physics-based planning for planetary exploration. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium. May 1998. 278~283
- 3 Kurihara S, Aoyagi S, Onai R. Adaptive selection of reactive/deliberate planning for a dynamic environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998, **24**(1998): 183~195
- 4 Olaverri A G, Hurtado F, Noy M. On the minimum size of visibility graphs. *Information Processing Letters*, 2002, **81**(2002): 223~230
- 5 Wu A Y, Rosenfeld A. Geodesic visibility in graphs. *Journal of Information Sciences*, 1998, **108**(1998): 5~12
- 6 Lee J H, Park S M, Chwa K Y. Simple algorithms for searching a polygon with flashlights. *Information Processing Letters*, 2002, **81**(2002): 265~270
- 7 WANG Y C, JING X J. Steering and control of nonholonomic wheeled mobile robots using artificial fields. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(5): 773~776
- 8 Lee W P. Evolving complex robot behaviors. *Information Sciences*, 1999, **121**(1999): 1~25
- 9 Ju H H, Cui P Y, Cui H T. A sensor-based motion planner: Situated-Bug. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2003, **10**(4): 353~358
- 10 Rigatos G G, Tzafestas C S, Tzafestas S G. Mobile robot motion control in partially unknown environments using a sliding-mode fuzzy-logic controller. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, **33**(2000): 1~11
- 11 Bonarini A, Basso F. Training to compose fuzzy behaviors for autonomous agents. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1997, **17**: 409~432
- 12 Pau L F. Behavioral knowledge in sensor/data fusion system. *Journal of Robotic System*, 1990, **7**(3): 295~308

居鹤华 北京工业大学副教授. 研究兴趣包括: 月球车导航与控制, 人工智能, 深空探测, 嵌入式系统, 力学.

(**JU He-Hua** Associate professor of Beijing University of Technology. His research interests include lunar rover navigation and control, artificial intelligence, deep space exploration, embedded system and mechanics.)

崔平远 哈尔滨工业大学教授. 研究兴趣包括: 深空探测, 飞行器工程.

(**CUI Ping-Yuan** Professor of Harbin Institute of Technology. His research interests include deep space exploration and spacecraft engineering.)

刘红云 北京工业大学副教授. 研究兴趣包括: 控制工程, 人工智能.

(**LIU Hong-Yun** Associate professor of Beijing University of Technology. Her research interests include control engineering and artificial intelligence.)