

文章编号:1671-6833(2013)05-0074-06

未知环境中自主机器人的路径规划研究

赵开新¹, 王东署²

(1. 河南机电高等专科学校 计算机科学与技术系, 河南 新乡 453002; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 未知复杂环境中自主机器人合理的路径规划是进行探索任务的前提. 传统的路径规划方法侧重于研究从起始点到目标点的无碰路径, 很少考虑机器人自身运动的平稳性. 研究了室外未知环境中考虑机器人姿态稳定性以及能量损耗的路径规划方法, 该方法分三步: (1) 梯度计算, 计算运动区域的梯度; (2) 节点探测, 运动区域被划分为平坦区域和非平坦区域, 辨识每个平坦区域的中心位置, 即节点; (3) 路径评估, 根据提出的评估函数, 规划出从当前位置经过中间节点到目标点的最优路径. 结合机器人的动力学特性, 利用反演控制, 设计了合适的控制率, 保证了机器人的平稳运动. 通过和传统规划方法获得的路径比较, 仿真验证了所提方法的有效性.

关键词: 自主机器人; 路径规划; 能量损耗; 数字高度图; 数字梯度图; 姿态稳定

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.05.016

0 引言

随着自主移动机器人在人类生产生活中的应用越来越广泛, 其工作环境变得越来越多样化, 更多地出现在室外未知的复杂环境中. 这些未知复杂环境通常是人类难以达到的或是非常危险的区域, 如星际探索、地下资源勘探、各种救灾现场等. 这些危险场所促使机器人研究人员将研究重心转向复杂环境中真实世界的挑战, 遥控操作移动机器人在这些环境的路径规划技术就成为主要的研究热点之一. 在很多未知复杂的应用环境中, 传统的机器人路径规划方法是规划出一条从起始点到目标点的、避开高梯度区域的无碰最短路径^[1]. 然而经验丰富的操作人员认为这样规划出来的路径并不合理, 因为机器人在这种路径上运动时要不断调整运动方向, 降低了运动的安全性, 增加了打滑或陷入某个陷阱的几率, 甚至可能造成侧翻, 导致机器人损坏和整个任务失败^[2].

因此机器人路径规划中仅仅考虑无碰的安全最短路径是不够的, 还应考虑机器人自身运动的平稳性. 国内外一些学者在此方面进行了一定的探索^[2-10], 如 Bapan 等^[9]以月球探测车为研究对

象, 研究了该自主机器人在不平坦地域中的运动情况, 在考虑机器人运行稳定性的基础上对备选路径进行评估, 但该方法没有把侧翻作为影响机器人稳定运行的不安全因素, 研究结果有一定局限性; Ishigami 等^[10]针对月球/星球探索漫游者机器人提出了一种路径规划方法, 并在动力学中研究了轮子打滑的影响, 但该规划方法避开了路径中的高梯度区域.

在移动机器人路径规划的指标函数中, 有学者提出利用消耗的能量作为目标来确定最优路径, 如 Rowe 和 Ross^[11]提出了复杂地形环境中以移动机器人能量损耗为评价指标的路径规划算法, 此后 Sun^[12]等对其进行了推广, 霍炜等^[13]对 Rowe 等提出的方法进一步推广至平面区域中移动机器人的路径规划.

笔者在前述研究基础上, 针对自主移动机器人在室外未知复杂环境中的路径规划问题, 提出了一种新的规划思想, 该思想吸收了自主机器人遥控操作人员的控制思想, 在进行路径规划时除考虑路径因素外, 还同时考虑了机器人侧翻和打滑对规划结果的影响, 并把沿该路径运行时消耗的能量也作为路径的性能评价指标之一, 规划出最

收稿日期: 2013-02-01; 修订日期: 2013-05-09

项目资助: 国家自然科学基金资助项目(61174085), 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20114101110005)

通信作者: 王东署(1973-), 男, 河南舞钢人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机器人智能控制研究.

优路径,并通过反演算法实现了机器人的动力学稳定控制.通过与传统路径规划方法进行比较,仿真验证了笔者方法的有效性.

1 路径规划方法

设自主机器人运行在室外未知的复杂环境中,利用三维激光传感器获得周围环境的信息.笔者所提出的路径规划方法由 3 步组成.

(1) 梯度计算

利用 3 维激光传感器采集环境信息,作为数字高度图的信息来源.数字高度图是一种基于网格的环境表示方法,其数据多少取决于网格的划分数量^[14].数字高度图中的某个网格用 $G_{height}(xn, yn)$ 表示,这里 xn 和 yn 是决定网格在 $x-y$ 坐标平面中位置的参数, $G_{height}(xn, yn)$ 表示网格所包含区域的最大高度,具体含义如图 1 所示.然后利用每个网格与它相邻的所有网格的高度差的绝对值中的最大值来表示该网格的梯度,把数字高度图上的每个网格的梯度全部计算一遍,这样又形成了一个新的基于网格的地图,即数字梯度图,其上的每个网格用 $G_{grad}(xn, yn)$ 表示.

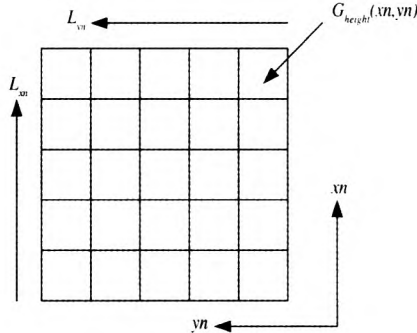


图 1 数字高度图的定义

Fig.1 Definition of digital altitude graphics

(2) 节点探测

计算数字梯度图上的水平区域,水平区域的探测利用阈值 $H_{threshold}$,若 $G_{grad}(xn, yn) \geq H_{threshold}$,则 $G_{height}(xn, yn)$ 所在网格就被认为是平坦区域,平坦区域的中心位置称为节点,并利用该节点来代表该平坦区域,如图 2 所示,节点连线形成边线,所有的节点和连线构成一幅地图,第三步的路径规划就是在地图上进行的.

(3) 路径评估

路径规划时机器人沿着这些边线运动,且应使机器人尽可能多地通过这些水平区域向目标点移动.开始时,探测与起始位置最接近的节点,命名为开始节点,同样,探测与目标位置最近的节

点,命名为目标节点,利用状态空间盲目搜索中的一般图搜索方法规划从起始点经其他节点到达目标点的备选路径.

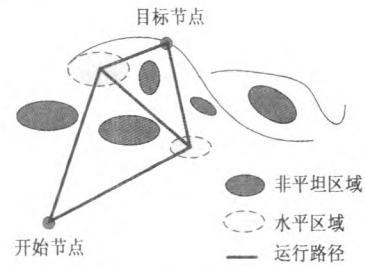


图 2 节点和路径简图

Fig.2 Nodes and path graphics

定义评估函数来对这些备选路径进行评估,定义如下

$$Cost = \sum_{path} \{ (k_{pos} * \Delta roll * \Delta yaw) + (k_{roll} * \Delta roll) + l + mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta) l \}. \quad (1)$$

式中: $\Delta roll$ 表示机器人偏离水平面的横滚角,°; Δyaw 表示路径上每个位置处的侧摆角度的变化量,°; l 表示路径上每部分的长度, m; k_{pos} 和 k_{roll} 是系数.评估函数中第一项 $k_{pos} * \Delta roll * \Delta yaw$ 表示控制机器人打滑的代价,第二项 $k_{roll} * \Delta roll$ 表示控制机器人侧翻的代价,第三项 l 表示路径冗余的代价,第四项表示机器人运动中沿某条直线运动时所消耗的能量.

2 能量计算的说明

能量的计算原理如下:设移动机器人运行环境的地形图已知,且由一系列的平面三角形组成.移动机器人的能量消耗可以定义为机器人在各三角形表面上运动时摩擦力与重力消耗能量之和,如图 3 所示,机器人由从 P_1 点沿直线运动到 P_2 点所消耗的能量 E 可由下式给出

$$E = mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta) l. \quad (2)$$

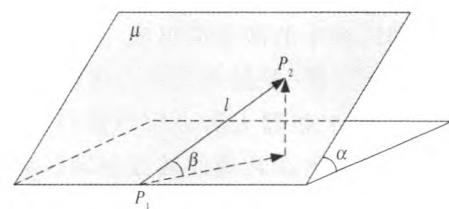


图 3 能量消耗示意图

Fig.3 Energy consumption sketch map

式中: m 为机器人的质量; μ , α 和 β 分别为机器人所在平面以及机器人的运动方向与水平面的

夹角.

笔者假设机器人匀速运动,转弯时无能量损耗.如图4所示,机器人运行过程中有3个禁止区域(用角度表示).第一个是禁止力区域(用角度 α_1 表示),表示上坡时坡度太陡机器人上不去的区域.另外两个禁止区域是侧翻区域(用角度 α_2 表示),表示机器人重心的投影点超出了支撑点构成的凸多边形而发生侧翻的区域.除了这3个禁止区域外,另一个特殊的区域是制动区域(用角度 α_3 表示),表示机器人下坡获得能量和加速度的区域.图4中的常规区域是机器人可以自由通行的区域.

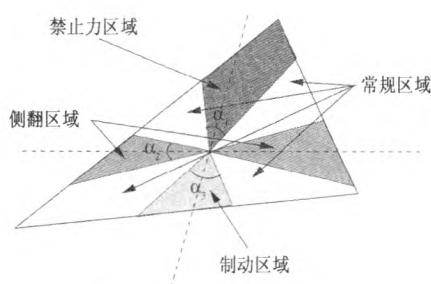


图4 四个区域示意图

Fig. 4 Sketch map of four areas

在制动区域,当机器人沿一定的运动方向 β 下坡时,有 $\mu\cos\alpha + \sin\beta < 0$,使机器人获得能量进而加速运动.所以,下坡时为使机器人保持匀速运动,应施加一个制动力 $-mg(\mu\cos\alpha + \sin\beta)$ 来避免机器人加速运动.制动区域 α_3 的两个临界制动角度 β_0 可通过下式计算得到

$$\mu\cos\alpha + \sin\beta_0 = 0. \quad (3)$$

当机器人在这两个临界制动角所组成的制动区域中运动时,下坡时获得的能量被用于制动,机器人在此范围内运动时不消耗能量.所以前述公式(2)表示的能量计算公式只在机器人运行于常规区域中才使用.

任意一个可行的路径由运动方向包含在常规区域和制动区域中的部分所组成.当机器人运动方向处于禁止区域(侧翻或禁止力区域)时,为使机器人有效运动,机器人沿Z字形路径运动以改变运动方向使其处在常规区域或制动区域中.这样必须假设机器人在处于常规区域的两个运动方向之间可以自由转向,即使其中一个方向处于禁止区域也可自由转向.特别地,如果禁止区域是侧翻区域,我们假设机器人可以快速充分旋转以避免侧翻.

3 自主移动机器人的动态性能分析

(1) 移动机器人动力学方程

研究对象为双后轮独立驱动刚性移动机器人,其动力学方程可用如下的状态方程描述^[15-16]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx. \end{aligned} \quad (4)$$

式中:状态向量 $x = [v \ \phi \ \dot{\phi}]^T$, v 为机器人的线速度, ϕ 为机器人的方向角,驱动控制输入 $u = [u_r \ u_l]^T$, u_r 和 u_l 分别为右轮和左轮的驱动输入,输出变量 $y = [v \ \phi]^T$, $A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_2 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} b_1 & b_1 \\ 0 & 0 \\ b_2 & -b_2 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $a_1 = -\frac{2c}{mr^2 + 2I_w}$, $a_2 = -\frac{2cl^2}{I_r r^2 + 2I_w l^2}$, $b_1 = \frac{kr}{mr^2 + 2I_w}$, $b_2 = \frac{kr l}{I_r r^2 + 2I_w l^2}$, c

为黏性摩擦系数; m 为机器人本体的质量; r 为车轮半径; I_w 为车轮的转动惯量; l 为左右轮到机器人重心的距离; I_r 为绕机器人重心的转动惯量; k 为驱动增益.

(2) 系统稳定性设计

下面采用反演方法(Back-stepping)对该移动机器人的运动进行控制,由于式(4)是线性耦合系统,要设计系统的控制率,首先进行解耦.令

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则 $u_r = u_1 - u_2$, $u_l = u_2$,将式(5)代入式(4)中,则式(4)可解耦为以下两个独立的子系统:

$$\dot{v} = a_1 v + b_1 u_1, \quad (6)$$

$$\phi = \omega \dot{\omega} = a_2 \omega + b_2 u_1 - 2b_2 u_2. \quad (7)$$

首先针对式(6)设计控制率,设机器人理想线速度为 v_d ,线速度误差为 $v_e = v_d - v$,定义Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2} v_e^2. \quad (8)$$

则:

$$\dot{V} = v_e \dot{v}_e = v_e (\dot{v}_d - a_1 v - b_1 u_1). \quad (9)$$

取控制率为:

$$u_1 = \frac{1}{b_1} (c_1 v_e + \dot{v}_d - a_1 v), \quad (10)$$

其中 $c_1 > 0$,则 $\dot{V} = -c_1 v_e^2 \leq 0$.

针对式(7)设计控制率,设机器人的理想方

向角为 ϕ_d , 则方向角误差为 $z_1 = \phi - \phi_d$, $\dot{z}_1 = \dot{\phi} - \dot{\phi}_d$, 引入虚拟控制量

$$\alpha_4 = -c_2 z_1 + \dot{\phi}_d, \quad (11)$$

其中 $c_2 > 0$. 定义 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2. \quad (12)$$

则

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (\dot{\phi} - \dot{\phi}_d) = z_1 (\dot{\phi} - c_2 z_1 - \alpha_4). \quad (13)$$

令 $z_2 = \dot{\phi} - \alpha_4$, 则

$$\dot{V}_1 = z_1 z_2 - c_2 z_1^2. \quad (14)$$

为保证系统稳定, 要求 $z_2 \rightarrow 0$. 定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2. \quad (15)$$

由于

$$\dot{z}_2 = \dot{\phi} - \dot{\alpha}_4 = a_2 \omega + b_2 u_1 - 2b_2 u_2 + c_2 \dot{z}_1 - \dot{\phi}_d, \quad (16)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = z_1 z_2 - c_2 z_1^2 + \\ z_2 (a_2 \omega - 2b_2 u_2 + c_2 \dot{z}_1 - \dot{\phi}_d) \end{aligned} \quad (17)$$

令控制率为

$$u_2 = \frac{1}{2b_2} (a_2 \omega + b_2 u_1 + c_2 \dot{z}_1 - \dot{\phi}_d + z_1 + c_3 z_2), \quad (18)$$

$$\text{则: } \dot{V} = -c_2 z_1^2 - c_3 z_2^2 \leq 0. \quad (19)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论, 系统在控制率式 (10) 和式 (18) 的作用下渐近稳定.

4 路径规划算法实现

(1) 笔者所提算法的实现

在梯度计算阶段, 每个网格的大小设为 1 m^2 , L_{xn} 和 L_{yn} 均取 100 m , 这样数字高度图上的网格数为 $10\,000$ 个. 节点探测阶段, $H_{\text{threshold}}$ 取 0.3 m , 路径规划阶段, 系数 $k_{\text{pos}} = 0.1$, $k_{\text{roll}} = 10$. 对式 (4) 所描述的被控对象, 利用文献 [16] 中的数据, $I_v = 10 \text{ kgm}^2$, $m = 200 \text{ kg}$, 机器人前后轮半径 $r = 0.1 \text{ m}$, $l = 0.3 \text{ m}$, $I_w = 0.005 \text{ kgm}^2$, $k = 5$, 可以计算出: $a_1 = -0.05$, $a_2 = -0.09$, $b_1 = 0.25$, $b_2 = 1.67$, 机器人运动速度 $v = 0.25 \text{ m/s}$, 控制参数 $c_1 = c_2 = c_3 = 10$.

在仿真环境中, 设定 A, B, C 和 D 四座小山坡, 高度分别为 $0.6, 1.0, 2.0$ 和 1.8 m , 其俯视图如图 5 所示, 路径规划的起点设在节点 A 附近, 目标点设在节点 D 附近, 图 5 所示是路径规划第一步所产生的数字梯度图 (俯视图).

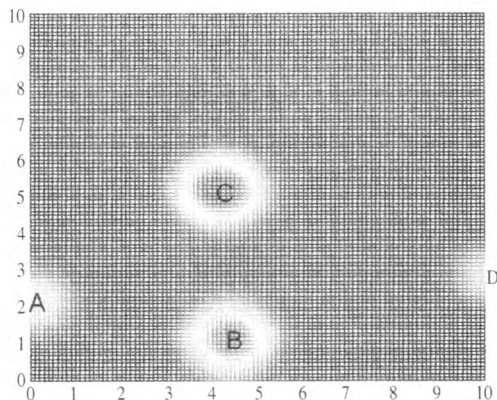


图5 实现环境 (俯视图)

Fig.5 Practical environment (planform)

节点探测阶段所产生的节点和边线 (红色直线) 如图 6 所示. 路径评估阶段, 利用一般图搜索方法规划从起始点经其他节点到达目标点的备选路径. 然后根据评估函数 (1), 分别计算不同路径的代价, 结果如表 1 所示. 运动过程中机器人匀速运动, 转弯时消耗能量为零, 参照公路的摩擦力系数, 室外位置环境的摩擦力系数取 0.4 (大于一般公路的摩擦系数), 表中所有数据都进行了取整处理. 把所获得的 5 条路径的总代价进行比较, 最后获得的最优路径是 $A \rightarrow B \rightarrow D$ 的路径, 即路径 2. 在表 1 中, 由于本文所提方法采用“直线路径” (俯视图中的效果, 实际运行路径为三维曲线), 这里吸收了自主机器人操作人员控制思想, 在实际工作环境中控制机器人沿“直线路径”运动, 避免机器人运动过程中运动方向频繁转换, 可有效避免打滑因素对机器人运行平稳性的影响, 所以表 1 中的前 5 条路径的打滑代价均为 0.

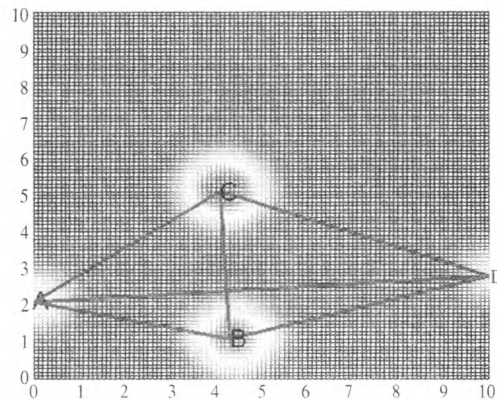


图6 笔者算法获得的路径 (俯视图)

Fig.6 Path achieved by proposed method (planform)

(2) 传统方法实现

为了和本方法获得的结果进行比较, 这里采用传统方法进行路径规划, 该方法也包含 3 个阶

段:梯度计算,障碍物探测和路径规划. 第一步的梯度计算和本方法完全相同,不再赘述. 第二步,障碍物探测,引入一个高度阈值 $H_{\text{threshold}} = 0.3 \text{ m}$,把数字梯度图上的网格划分为自由空间的网格和有障碍物空间的网格. 高度值大于 $H_{\text{threshold}}$ 的网格被认为是含有障碍物的网格. 这一步把非平坦区域中的 3 维路径规划问题转化为考虑避障的 2 维路径规划问题. 第三步的路径规划阶段,在自由空间中采用最短路径搜索方法来规划一条从起点 A 到终点 D 的最短路径. 所规划的路径依赖于第二步中在数字梯度图中设定的阈值 $H_{\text{threshold}}$,利用该方法获得的最短路径如图 7 所示(俯视图). 在计算该路径的各个代价时,把曲线路径划分为 10 条短的直线路径进行简化处理,再把 10 条直线路径获得的代价相加即可获得该曲线路径的近似代价表示.

表 1 不同路径的代价比较
Tab.1 Cost comparison among different paths

路径 序号	所经节点	打滑 代价	侧翻 代价	距离 代价	消耗 能量	总代 价
1	A→C→D	0	164	12	602	778
2	A→B→D	0	127	11	529	667
3	A→C→B→D	0	341	16	903	1 260
4	A→B→C→D	0	186	15	732	933
5	A→D	0	146	10	537	683
6	图 7 所示路径	150	1 078	12	759	1 999

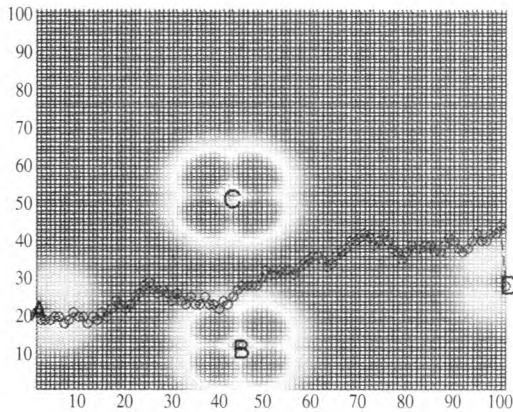


图 7 传统方法获得的路径(俯视图)

Fig.7 Path obtained by traditional approach (planform)

(3)讨论

采用本方法获得的最优路径是表 1 中的路径 2,虽然最短路径是路径 5,但路径 2 的侧翻代价和消耗能量均略小于路径 5 的对应项,使得路径 2 的总代价略小于路径 5 的总代价,故路径 2 为规划的最优路径.

利用传统方法获得的最优路径的打滑代价较大,虽然路径 6 和路径 2 相比,距离代价相差不大,但路径 6 的打滑以及侧翻代价之和远大于路径 2 的侧翻代价,消耗能量也大于路径 2 的对应项,这是由于在机器人运动过程中,传统方法总是迫使机器人不断调整运动方向,增加了打滑和侧翻的风险,同时也增加了能量消耗,而这正是机器人实际运动控制中应尽量避免的.

5 结论

针对非平坦复杂区域中自主机器人的路径规划,参考救灾环境中遥控操作人员的经验,设计了机器人路径规划方法,该方法与传统方法的区别有两点:(1)该方法除考虑路径因素外,还同时考虑了打滑和侧翻因素对规划结果的影响,并考虑了路径的能量损耗,使规划的最优路径更安全、更合理;(2)通过反演控制设计了合适的控制率,保证了机器人自身运动的平稳性. 把该方法规划的最优路径与传统方法规划的路径进行了对比分析,仿真结果验证了笔者所提方法的有效性.

参考文献:

[1] IAGEMMA K, DUBOWSKY S. Mobile robot in rough terrain: estimation, motion planning and control with application to planetary rovers[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2004(12):17-50.

[2] OHKI T, NAGATANI K, YOSHIDA K. Safety path planning for mobile robot on rough terrain considering instability of attitude maneuver[C]. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 55-60.

[3] 罗德林,吴顺祥. 基于势场蚁群算法的机器人路径规划[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(6):1277-1280.

[4] 任建伟,王飞,吕微. 分层模糊控制的移动机器人路径规划[J]. 科学技术与工程,2010,10(10): 2317-2321.

[5] 康亮,赵春霞,郭剑辉. 基于模糊滚动 RRT 算法的移动机器人路径规划[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2010,34(5):642-648.

[6] 唐建平,宋红生,王东署. 一种移动机器人动态环境下的路径规划[J]. 郑州大学学报:理学版,2012,44(1):75-78.

[7] AHMED E, ACHIM W. Lyapunov stability study for a special actuated holonomic wheeled mobile robot[C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2011:1962-1967.

- [8] SHEN C C, KE J H, CHENG H L. Trajectory planning for stair climbing in the leg-wheel hybrid mobile robot *Quattroped*[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011: 1229 – 1234.
- [9] BAPNA D, ROLLINS E, MURPHY J, et al. The atacama desert trek: outcomes[C]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 597 – 604.
- [10] ISHIGAMI G, NAGATANI K, YOSHIDA K. Path planning for planetary exploration rovers and its evaluation based on wheel slip dynamics[C]. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, 2007, 2361 – 2366.
- [11] ROWE N C, ROSS R S. Optimal grid-free path planning across arbitrarily contoured terrain with anisotropic friction and gravity effects [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6 (5): 540 – 553.
- [12] ZHENG Sun, JOHN H R. Finding energy-minimizing paths on terrains[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21 (1): 102 – 114.
- [13] 霍炜,刘大维,王江涛. 基于局部最小能量的移动机器人路径规划[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29 (4): 99 – 104.
- [14] NAGATANI K, MATSUZAWA T, Yoshida K. Scan-point planning and 3-d map building for a 3-d laser range scanner in an outdoor environment[C]. Proceedings of the 7th international conference on field and service robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics, 2009.
- [15] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [16] WATANABE K, Tang J, Nakamura M, et al. A Fuzzy-Gaussian Neural Network and Its Application to Mobile Robot Control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1996, 4 (2): 193 – 199.

Research of Autonomous Mobile Robot Path Planning in Unknown Complex Environment

ZHAO Kai-xin¹, WANG Dong-shu²

(1. Department of Computer Science & Technology, Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang, 453002;
2. Electrical Engineering School of Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001)

Abstract: Suitable path planning is a precondition of the autonomous robot exploration in outdoor unknown complex environments. The conventional path planning methods focus particularly on planning an un – colliding path from the start position to the goal position. Robot attitude stability and its dynamics are seldom considered. A new path planning approach considering the robot's attitude stability and energy consumed in outdoor complex environment is proposed, which consists of three steps: (1) gradient calculation, the gradients of the rough terrain are calculated; (2) nodes detection, the terrain is divided into flat regions and rough regions according to a height threshold; (3) path evaluation, the optimal path from current position to goal via intermediate nodes is planned based on the cost evaluation function. Furthermore, robot dynamic characteristics are analyzed through back – stepping control, suitable control law is proposed which ensures the stable motion of robot. Compared with the conventional approach, the effectiveness of the proposed method is demonstrated through simulations.

Key words: Autonomous Robot; Path Planning; Energy Consumed; Digital Height Map; Digital Gradient Map, Attitude Stability