

面向月球车路径规划的多约束环境建模方法*

史美萍, 吴 军, 李 焱, 贺汉根

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:面向月球车路径规划,从建立合理、鲁棒的月面环境模型的需求出发,提出了一种新的多约束环境建模方法——MCWM方法,它综合考虑了月面地形的可通行性、系统的不确定性、人机协同性和运动的平稳性等四个因素,最后产生了一个能支持路径规划的综合代价地图——MCWM模型。仿真结果表明,MCWM方法合理、有效,可提高所规划路径的安全性和可执行性。

关键词:月球车;路径规划;环境建模;MCWM方法

中图分类号:TP18 **文献标识码:**A

A Multi-constrained World Modeling Method in Lunar Rover Path-planning

SHI Mei-ping, WU Jun, LI Yan, HE Han-gen

(College of Mechnronics and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:To build a feasible and robust setting model in lunar rover path-planning, MCWM, a novel method of setting modeling, was proposed. The terrain traversability, system uncertainty, human-machine cooperation and movement smoothness were taken into account. Then, for the creation of MCWM model, a synthetic cost map for path-planning was created. Simulation results show that MCWM can improve the safety and performability-of the path, thus the feasibility and validity of the modeling is confirmed.

Key words:lunar rover; path-planning; world modeling; MCWM method

对月探测是世界上多个国家和研究机构重点关注的研究项目,我国也正在积极开展相应的研究工作。其中,月面环境模型作为路径规划和导航的基础,直接关系到月球车的工作效率和生存安全,是实现鲁棒导航的关键环节。现有的月球探测资料表明,月球表面存在着经过复杂漫长的演化而形成的月海、月坑、月陆、月脉、月谷等地貌形态,如果以 20~25cm 作为月球车的越障高度,月面将崎岖不平,构成一个高度复杂的非结构化环境,这时,如果仍采用已有的环境建模方法^[2-8],月球车的导航操作可能会陷入困境。为了更好地解决月球车的安全导航问题,本文提出了一种新的面向月球车路径规划的多约束环境建模方法——MCWM(multi-constrained world modeling)方法。

1 MCWM 环境建模方法

1.1 月面地形的可通行性

在月球车导航过程中,月球车必须主动避开地图中的不可通行区域(记作 NFD),而不可通行区域主要通过通过对月面 DEM(三维数字高程模型)进行可通行性分析得到。其分析步骤为:首先,将 DEM 按月球车轮子的投影面积进行均匀划分,形成一个栅格网,其中每一栅格 cell 均由多个高程点组成;然后,以每一栅格为中心,以月球车车体投影面积为分析窗口 patch 逐个对栅格进行地形统计分析^[1](本文采用最小二乘法),以此来提取月面的基本地形因子,具体包括地形坡度 θ 、地形粗糙度 \bar{D} 和地形起伏度 RF ;最后,根据月球车的通过性约束来分析月球车在所选区域的可通行性,并据此形成一个可通行性地图。

* 收稿日期:2006-05-28

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60234030)

作者简介:史美萍(1968—),女,副教授,博士生。

月面地形的可通行性考虑了阶梯障碍、斜坡障碍和粗糙地形等障碍因素,分别对应于月球车的垂直越障能力、爬坡能力和多轮协调控制能力等约束条件。其中,地形粗糙度 \bar{D} 的求取又需考虑两个层次:一个是分析窗口的粗糙度 \bar{D}_{patch} ,其次是该分析窗口中所有栅格的粗糙度的最大值 $\max_ \bar{D}_{cell}$,即有

$$\bar{D} = \max(\bar{D}_{patch}, \max_ \bar{D}_{cell}) \tag{1}$$

由于月面环境的复杂性,其地形特征通常表现为各种障碍的不同组合。为此,在对所分析栅格进行可通行性评估时,需综合考虑各种障碍的分析结果。若定义待分析栅格的可通行代价函数为 f_{cell}^{trav} ,则有:

$$f_{cell}^{trav} = \max[f_{slope}(\theta), f_{roughness}(\bar{D}), f_{step}(RF)] \tag{2}$$

式中, $f_{step}(RF)$ 为阶梯代价函数, $f_{slope}(\theta)$ 为斜坡代价函数, $f_{roughness}(\bar{D})$ 为粗糙代价函数。这三种函数的引入是为了将月球车在不同地形上的可通行性以行进代价的形式描述出来,以便于后续的路径规划。

为了提高可通行性分析的鲁棒性,减少可通行性分析结果对感知质量的依赖,本文在可通行分析的评估过程中采用了分段赋值的思想。以斜坡式代价函数为例, $f_{slope}(\theta)$ 可定义为

$$f_{pitch}(\theta) = \begin{cases} +\infty & (\theta \geq \theta_{max}^{c\ lim\ b}) \\ c_{max}^{pitch} & (k_{p2}\theta_{max}^{c\ lim\ b} \leq \theta < \theta_{max}^{c\ lim\ b}) \\ 255 \times \frac{\theta}{\theta_{max}^{c\ lim\ b}} & (k_{p1}\theta_{max}^{c\ lim\ b} \leq \theta < k_{p2}\theta_{max}^{c\ lim\ b}) \\ c_{min}^{pitch} & (0 < \theta < k_{p1}\theta_{max}^{c\ lim\ b}) \end{cases} \tag{3}$$

式中, k_{p1} 和 k_{p2} 为系数, $0 < k_{p1} < k_{p2} < 1$; c_{min}^{pitch} 和 c_{max}^{pitch} 分别为一较小和较大的常值, $c_{min}^{pitch} \ll 255k_{p1}$, $c_{max}^{pitch} \gg 255k_{p2}$ 。 k_{p1} 、 k_{p2} 、 c_{min}^{pitch} 和 c_{max}^{pitch} 的取值可根据实际需要或经验知识确定。

1.2 系统的不确定性

在月面环境探测过程中,月球车车载传感器所获得的感知信息存在着不同程度的不确定性,这种感知信息的不确定性必然导致模型的不确定性,从而造成规划和决策的偏差,并导致月球车在运动过程中可能与障碍物发生碰撞。为了尽量避免月球车紧贴障碍物运行,减少系统不确定性对月球车导航安全性的影响,本文引入了潜在危险区的概念。

定义 1 潜在危险区(risky area):表示在不可通行区的基础上所作的危险膨胀,记作 RA 。其膨胀宽度为 D_{RA} 。具体如图 1 所示。

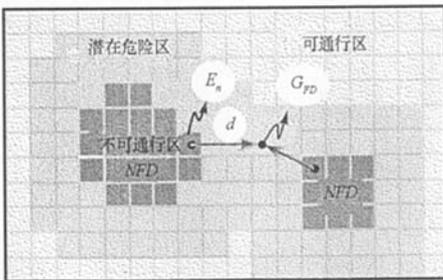


图 1 不确定性的危险性度量示意图

Fig.1 Danger degree measurement of uncertainty

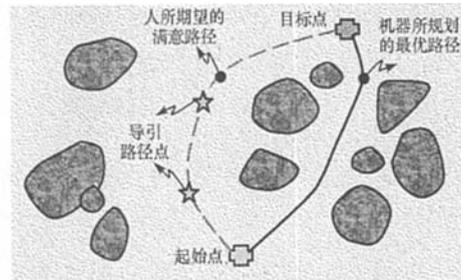


图 2 人的感知与决策对路径规划的影响

Fig.2 Influence of human perception and decision in path planning

基于上述定义,现假设在可通行地图中包含有 N 个独立的不可通行区 $NFD_j (j = 1, 2, \dots, N)$,其相应的边界栅格集合记为 ∂NFD_j ,则对于可通行区域 FD 中的任一栅格 G_{FD} ,可通过引入危险性度量函数 $f_{G_{FD}}^{risky}$ 来描述由不确定性而导致的危险信息,并将其定义为:

$$f_{G_{FD}}^{risky} = 255 \cdot \left\{ 1 - \prod_{j=1}^N [1 - \Gamma(d(NFD_j, G_{FD}))] \right\} \tag{4}$$

$$\Gamma[d(NFD_j, G_{FD})] = \begin{cases} \iint_{G_{FD}} \rho'(d(NFD_j, G_{FD})) dx dy, & d(NFD_j, G_{FD}) \leq D_{RA} \\ 0, & d(NFD_j, G_{FD}) > D_{RA} \end{cases} \quad (5)$$

$$d(NFD_j, G_{FD}) = \min_{E_n \in \partial NFD_j} d(E_n, G_{FD}) = \min_{E_n \in \partial NFD_j} \sqrt{(x_{E_n} - x_{G_{FD}})^2 + (y_{E_n} - y_{G_{FD}})^2} \quad (6)$$

式中, (x_{E_n}, y_{E_n}) 和 $(x_{G_{FD}}, y_{G_{FD}})$ 分别为边界栅格 E_n 和可通行栅格 G_{FD} 的中心点坐标。 $\rho'(r)$ 为服从参数 $(\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, \gamma)$ 的二维正态分布, 且有 $\mu_1 = x_{E_n}, \mu_2 = y_{E_n}, \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \gamma = 0$ 。

1.3 人机协同性

与人的智能相比, 计算机在低维空间具有很强的寻优能力。然而, 限于真实环境难以准确描述, 再加上不可能事先将人与环境交互中所形成的有意识的认知方法和无意识的反应机理——编制成程序, 所以由机器规划出来的最优路径从人的角度看可能并不是最优的(如图2所示)。为了能规划出更接近人类思维的满意路径, 本文将人的高层决策和规划行为以导引路径点(Artificial-guided Waypoints, GP)的形式添加到模型中, 以实现以人为主, 人与机器共同协作的智能路径规划。

导引路径点是由地面操作人员以动态交互的方式选取的关键路途点, 对路径规划起到导引指示作用。若定义以 $GP = (x_{GP}, y_{GP})$ 为圆心, 以 D_{GP} ($D_{GP} \geq 0$) 为半径的圆域作为导引路径点的导引区(记作 A_{guide}), 即

$$A_{guide} = \{(x, y) \mid d = \sqrt{(x - x_{GP})^2 + (y - y_{GP})^2} \leq D_{GP}\} \quad (7)$$

则可引入路径导引函数 Ψ_{GP}^{guide} 将导引路径点的作用反映到路径规划模型中, 并将其定义为

$$\Psi_{GP}^{guide}(d) = \begin{cases} 255 \times \left(\frac{D_{GP} - d}{D_{GP}}\right)^2, & d \leq D_{GP} \\ 0, & d > D_{GP} \end{cases} \quad (8)$$

式中, D_{GP} 为导引区的作用半径, d 为点 (x, y) 到导引路径点 GP 的距离, $d = \sqrt{(x - x_{GP})^2 + (y - y_{GP})^2}$ 。

基于上述定义, 现假设在可通行地图中包含有 M 个导引路径点 $A_{GP} = \{GP_i\}, i = 1, 2, \dots, M$, 则对于可通行区域中的任一栅格 G_{FD} , 其路径导引信息可表示为

$$f_{G_{FD}}^{guide} = \max_{GP_i \in A_{GP}} [\Psi_{GP_i}^{guide}(d(GP_i, G_{FD}))] \quad (9)$$

式中, $d(GP_i, G_{FD})$ 为路径导引点 GP_i 到 G_{FD} 栅格中心的距离。

1.4 运动的平稳性

在栅格化地图中进行路径规划时, 通常假设月球车的运动方向为八连通, 而实际应用中, 总期望月球车在行进过程中能够减少转向操作, 尽量沿着比较平滑的轨迹行驶, 这样可保证月球车运动的平稳性, 有利于车体定位操作, 同时降低能量消耗。

为了能将运动的平稳性反映到路径规划模型中, 本文引入路径平滑性度量函数 $f_p^{smooth}(\omega)$, 并定义为:

$$f_p^{smooth}(\omega) = 255q(\omega) \quad (10)$$

式中, p 代表当前节点, n 代表待扩展节点, ω 为当前路径方向与待扩展路径方向的夹角, $q(\omega)$ 为平滑性度量因子, 其函数表达式为

$$q(\omega) = \begin{cases} \epsilon_0 & \omega = 0^\circ \\ \epsilon_1 & \omega = 45^\circ, 315^\circ \\ \epsilon_2 & \omega = 90^\circ, 270^\circ \\ \epsilon_3 & \omega = 135^\circ, 225^\circ \\ \epsilon_4 & \omega = 180^\circ \end{cases} \quad (11)$$

式中, $0 \leq \epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3 < \epsilon_4 \leq 1, \epsilon_0 \sim \epsilon_4$ 的取值可根据实际需要或经验知识确定。本文取 $\epsilon_0 = 0, \epsilon_1 =$

0.25, $\epsilon_2 = 0.5$, $\epsilon_3 = 0.75$, $\epsilon_4 = 1$ 。

1.5 MCWM 算法

综上所述,MCWM 环境建模方法将月球车工作空间划分为大小为月球车车轮投影面积 ΔS_{wheel} 的栅格空间,每一栅格的属性可通过一个 5 元组 $(i, j, c_{ij}^{\text{trav}}, c_{ij}^{\text{risky}}, c_{ij}^{\text{guide}})$ 进行描述,其中 (i, j) 表示每一栅格的坐标, c_{ij}^{trav} 、 c_{ij}^{risky} 和 c_{ij}^{guide} 分别表示 (i, j) 栅格的可通行性、潜在危险性和路径导引信息。另外,为了能够有效地引导路径规划尽量沿着比较平滑的方向搜索,MCWM 还包含了路径平滑性度量模型 $C_8^{\text{smooth}} = (c_0^{\text{smooth}}, c_1^{\text{smooth}}, \dots, c_7^{\text{smooth}})$, 且 $c_i^{\text{smooth}} = f_{\text{pn}}^{\text{smooth}}(45^\circ \times i)$ 。据此,MCWM 算法可描述如下:

算法 (MCWM 模型的创建算法)

输入: $Z_{k \times l}^{\text{DEM}} = (z_{ij})_{k \times l}$ (月面数字高程模型)

输出: MCWM 模型 $\langle C_{m \times n}^{\text{trav}}, C_{m \times n}^{\text{risky}}, C_{m \times n}^{\text{guide}}, C_8^{\text{smooth}} \rangle$

$$C_{m \times n}^{\text{trav}} = (c_{ij}^{\text{trav}})_{m \times n} \quad C_{m \times n}^{\text{risky}} = (c_{ij}^{\text{risky}})_{m \times n} \quad C_{m \times n}^{\text{guide}} = (c_{ij}^{\text{guide}})_{m \times n} \quad C_8^{\text{smooth}} = (c_0^{\text{smooth}}, c_1^{\text{smooth}}, \dots, c_7^{\text{smooth}})$$

步骤 1: 读取数字高程模型 $Z_{k \times l}^{\text{DEM}}$;

步骤 2: 以 ΔS_{wheel} 为大小,对 $Z_{k \times l}^{\text{DEM}}$ 进行栅格化,得到一个大小为 $m \times n$ 的栅格网;

步骤 3: 初始化 MCWM 模型,令 $C_{m \times n}^{\text{trav}} = C_{m \times n}^{\text{risky}} = C_{m \times n}^{\text{guide}} = C_8^{\text{smooth}} = 0$;

步骤 4: 对栅格网中的每一栅格 $cell_{ij}$ 进行可通行性分析,并令 $c_{ij}^{\text{trav}} = f_{\text{cell}_{ij}}^{\text{trav}}$, 据此可得到一个可通行地图;

步骤 5: 基于可通行性分析结果,对栅格网中的每一栅格 (i, j) 进行潜在危险性的计算,并令 $c_{ij}^{\text{risky}} = f_{\text{FD}}^{\text{risky}}$;

步骤 6: 根据导引路径点集合 A_{CP} , 对每一栅格 (i, j) 进行路径导引信息的计算,并令 $c_{ij}^{\text{guide}} = f_{\text{cell}_{ij}}^{\text{guide}}$;

步骤 7: 建立路径平滑性度量模型 $C_8^{\text{smooth}} = (c_0^{\text{smooth}}, c_1^{\text{smooth}}, \dots, c_7^{\text{smooth}})$, 其中, $c_i^{\text{smooth}} = f_{\text{pn}}^{\text{smooth}}(45^\circ \times i)$;

步骤 8: 输出 MCWM 模型。

2 合理性验证与仿真结果分析

为了验证 MCWM 算法的合理性和有效性,可首先应用该算法得到 MCWM 模型,然后以此为基础构建一个栅格图,其节点为栅格点,连接节点之间的边表示这两个节点的相邻关系,并赋予综合考虑距离、可通行性、平滑性、不确定性和人的决策与规划等多种因素下的一个综合代价值,最后应用通用图搜索算法(如逆向 A^* 算法)搜索这个栅格图以寻求最优路径,并对所得到的路径进行分析与评估。

若定义相邻节点(p 和 n)的边的代价函数为 $g(p, n)$, 则有

$$g(p, n) = \alpha_1 \cdot g_{\text{trav}}(p, n) + \alpha_2 \cdot g_{\text{risky}}(p, n) + \alpha_3 \cdot g_{\text{guide}}(p, n) + \alpha_4 \cdot g_{\text{smooth}}(p, n) \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} g_{\text{trav}}(p, n) = d(p, n) \cdot (c_p^{\text{trav}} + c_n^{\text{trav}}) \\ g_{\text{risky}}(p, n) = d(p, n) \cdot (c_p^{\text{risky}} + c_n^{\text{risky}}) \\ g_{\text{guide}}(p, n) = -d(p, n) \cdot (c_p^{\text{guide}} + c_n^{\text{guide}}) \\ g_{\text{smooth}}(p, n) = f_{\text{pn}}^{\text{smooth}}(\omega) = c_i^{\text{smooth}}, i = \omega/45^\circ \end{cases} \quad (13)$$

$$d(p, n) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{当节点 } p \text{ 和节点 } n \text{ 为水平或垂直相邻时} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \text{当节点 } p \text{ 和节点 } n \text{ 为对角相邻时} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $g_{\text{trav}}(p, n)$ 为从节点 p 到节点 n 的可通行性代价函数, $g_{\text{risky}}(p, n)$ 为潜在危险性代价函数, $g_{\text{guide}}(p, n)$ 为路径导引性代价函数(其代价值为负), $g_{\text{smooth}}(p, n)$ 为路径平滑性代价函数; α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 为权值。

基于上述思想,本文以自行研制的月球车硬软件平台为基础,对 MCWM 建模方法的合理性和有效性

进行了大量的仿真试验。图3(a)给出某一野外环境的DEM数据,其相应的可通行性地图如图3(b)所示。

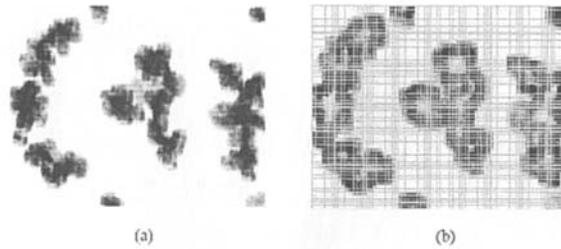


图3 全局DEM与全局可通行性地图

Fig.3 Global DEM and global traversability map

为了验证MCWM模型中各种因素对路径规划的影响,图4给出了4种典型的路径规划结果。其中,(a)图为 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0$ 时的最优路径,(b)图为 $\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.3, \alpha_3 = \alpha_4 = 0$ 时的最优路径,(c)图为 $\alpha_1 = 0.67, \alpha_2 = 0.26, \alpha_3 = 0.07, \alpha_4 = 0$ 时的最优路径,(d)图为 $\alpha_1 = 0.44, \alpha_2 = 0.17, \alpha_3 = 0.05, \alpha_4 = 0.34$ 时的最优路径。

分析图4中的4种情况可知,(a)图中由于只考虑了地形的可通行性,所以尽管其路径最短,但离障碍物的距离却最近,这种情况很不利于月球车的安全行驶;(b)图中由于考虑了系统的不确定性,所以其最优路径与(a)图相比安全性有所提高,但还不是所期望的满意路径;而在(c)图中,由于它不仅考虑了地形的可通行性和系统的不确定性,而且还考虑了人的高层决策与规划(以五角星标记),所以其规划的最优路径很接近我们所期望的满意路径;(d)图则由于进一步地考虑了路径的平滑性,所以其规划的路径性能最好。

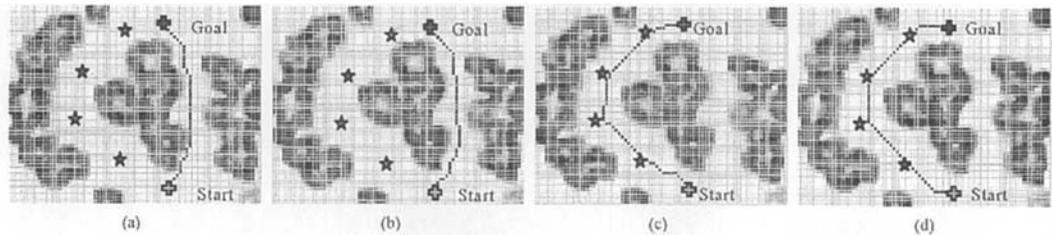


图4 基于MCWM方法的最优路径规划结果示意图

Fig.4 Result of optimal path planning based on the MCWM method

由此可知,在基于MCWM模型进行路径规划时,通过选择合适的参数,就可以规划出满足多种性能指标的满意路径,并提高了路径规划的安全性和可执行性。

3 结论

从月球车的实际应用出发,提出了一种新的适合于月球车路径规划的环境建模方法——MCWM方法。仿真结果表明,MCWM方法能够合理、有效地描述月面地形的可通行性、系统的不确定性、人机协同性和运动的平稳性,使得在基于MCWM环境模型进行路径规划时,通过选择一组合适的路径参数($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, D_{RA}, D_{CP}$),就可以规划出满足多种性能指标的满意路径,从而提高路径规划的安全性和可执行性。

然而,在实际应用中,如何进行路径参数($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, D_{RA}, D_{CP}$)的选择与优化,使得月球车的路径规划能综合考虑多种性能指标,如安全性能最好、行驶代价最小、路径长度最短和体现决策者意图最大等,最终得到一条“最优”导航路径,是一个典型的多目标优化问题。为此,下一步将以多目标优化理论和进化计算为基础,进一步展开基于MCWM环境建模方法的多目标路径规划问题的研究。

3 结论

提出并实现了一种单像机运动目标定位的新方法——共线方程法。仿真计算证明了此方法的正确性和可行性,在保证系统测角精度和光心坐标定位精度足够高的条件下,此方法可以给出工程上实用的目标定位结果。由于本文提出的方法无需目标距离信息或目标上已知控制点,在其它单像机成像场合也有较好的应用前景,例如在空间侦察与对抗任务中,己方卫星对目标的单目观察;在潜艇对海、空目标的观察工具潜望镜中得到的目标单目序列图像等。

参考文献:

- [1] 石培新. 巡航导弹飞行试验所使用的关键靶场设备[J]. 飞航导弹, 2000(3): 26-31.
- [2] 杜小平, 赵继广, 崔占忠, 等. 基于计算机视觉的航天器间相对状态测量系统[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 664-666.
- [3] 樊祥. 光电攻击在反卫星侦察、预警方面的应用[J]. 航天电子对抗, 2000(4): 33-37.
- [4] 郑庆晖, 张育林. 编队飞行相对位置姿态测量算法及实验[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(2): 19-24.
- [5] 金为铤. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.
- [6] Lepetit V. Monocular Model-based 3D Tracking of Rigid Objects[M]. Now Publishers Inc., 2005.
- [7] 李洲. 测量飞机对巡航导弹的跟踪[J]. 飞航导弹, 2000(5): 51-56.
- [8] 高德平. 巡航导弹的试验与鉴定[J]. 飞航导弹, 1997(10): 9-17.
- [9] 刘利生. 外测数据事后处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [10] Fischler M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography[C]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [11] 汤建良. 透视 n 点定位(PnP)问题研究[D]. 中国科学院数学与系统科学研究院, 2003.
- [12] Horand R, Conio B, Leboulloux O. An Analytic Solution for the Perspective 4-Point Problem[C]. CVGIP, 1989, 47: 33-44.
- [13] 胡占义, 雷成, 吴福朝. 关于 P4P 问题的一点讨论[J]. 自动化学报, 2001, 27(6): 770-776.
- [14] 王颖, 张小虎. 视频图像记录判读系统[J]. 光学技术, 2003, 29(2).
- [15] 于起峰, 等. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(上接第 108 页)

参考文献:

- [1] 汤国安, 刘学军, 等. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 戴博, 肖晓明, 蔡自兴. 移动机器人路径规划技术的研究现状与展望[J]. 控制工程, 2005, 12(3): 198-202.
- [3] Khatib O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [4] Goldberg S B, Maimone M W, Matthies L. Stereo Vision and Rover Navigation Software for Planetary Exploration[C]. Proc. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, March 2002.
- [5] Urmsion C P, et al. Stereo Vision Based Navigation for Sun-synchronous Exploration[C]. Proc. of IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2002.
- [6] Singh S, et al. Recent Progress in Local and Global Traversability for Planetary Rovers[C]. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA, April 2000.
- [7] Gennery D B. Traversability Analysis and Path Planning for a Planetary Rover[J]. Autonomous Robots, 1999.
- [8] Kelly A, Stentz A. Rough Terrain Autonomous Mobility-Part 1: A Theoretical Analysis of Requirements[J]. Autonomous Robots 5, 1998: 129-161.

