

行为控制月球车路径规划技术¹⁾

居鹤华^{1,2} 崔平远¹ 崔祜涛¹

¹⁾(哈尔滨工业大学深空探测基础研究中心 哈尔滨 150001)

²⁾(北京工业大学电控学院 北京 100022)

(E-mail: Juhehua@163.com)

摘要 提出了一种新的路径规划方法即自主行为路径规划方法. 该方法能够自动构造大范围自然环境下与路径规划任务相关的一类拓扑结构, 从而大大地提高自然环境下月球车路径规划速度. 该方法在 Tangent-Bug 切线法基础上引入一组自适应行为来构造切线拓扑图, 它是人工路径规划行为的模仿, 克服了计算几何路径规划方法非线性计算时间的不足. 文中给出了相关定义、定理、算法及真实环境下的仿真结果.

关键词 路径规划, 行为控制, 基于行为的控制, 月球车, 机器人

中图分类号 TP24

Autonomous Behavior Path Planning for Lunar Rover

JU He-Hua^{1,2} CUI Ping-Yuan² CUI Hu-Tao¹

¹⁾(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

²⁾(School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

(E-mail: Juhehua@163.com)

Abstract This paper deals with a new autonomous behavior path planning method for the lunar rover, which adapts to any obstacles and allows for the real world with large area. The path-planning scheme greatly improves computation egeometrics based path planning methods by using a group of adaptive and oriental behaviors which simulate human behaviors for path planning to construct the topological graph of Tangent-Bug automatically and quickly. At the same time, basic terms, definitions and theorems of the method as well as simulation results in the real world are presented.

Key words Path planning, behavior control, behavior-based control, lunar rover, robot

1 引言

本文自主行为路径规划方法与自主行为避障方法是互补的, 它产生最优路径站点序列,

1) 国防基础科研基金(J1600B001)资助

Supported by National Defense Basic Research Fund of P. R. China(J1600B001)

收稿日期 2002-05-14 收修改稿日期 2002-09-09

Received May 14, 2002; in revised form September 09, 2002

自主行为避障方法实时产生满足月球车机动性约束并拟合已规划站点的路径,它们与人的路径规划行为相一致.自主行为避障方法^[1,4]引入用模糊规则实现的目标趋向行为、左右转向行为及它们协调产生的避障行为.自主避障行为实现由第 i 个站点向第 $i+1$ 个站点行进并避开障碍.月球车周围一定范围内没有障碍时由目标趋向行为控制,即向着第 $i+1$ 个站点行进,否则由避障行为控制.为避免陷入障碍及满足路径最短要求,相邻站点应是可视的^[2].自主行为路径规划方法先建立障碍结构图,并模仿人的路径规划行为采用的切线法及趋向目标方向搜索法.该方法使 TangentBug^[5] 方法具有了方向性及自适应性,可提供满足月球车机动性能要求的最短路径,并可在动态环境下作局部修改.本文介绍自主行为路径规划的基本定义、定理及障碍结构图、自主行为路径规划算法,并给出真实环境下的路径规划仿真结果.

2 自主行为路径规划的障碍结构图

自主避障行为工作空间是增广平面障碍图,自主行为路径规划工作空间是增广平面障碍着色图.

a) 增广平面障碍图

由月球车视觉系统(或由月球轨道器及登陆器在下降过程中测绘)得到地形数据,绘制图 1 左上所示网格高程图.经网格点平均梯度计算及高度、面积相关规则提取得到三维障碍图,并向当地水平面投影得到图 1 中上所示的平面障碍图.对之进行轮廓提取、腐蚀处理(由月球车安全半径确定迟拓像素多少)及滤波去除噪声,分别得到图 1 右上及左下所示的障碍轮廓图和增广平面障碍图(简记障碍图),障碍图中相邻障碍空隙对应的地形都是月球车可行走的区域.

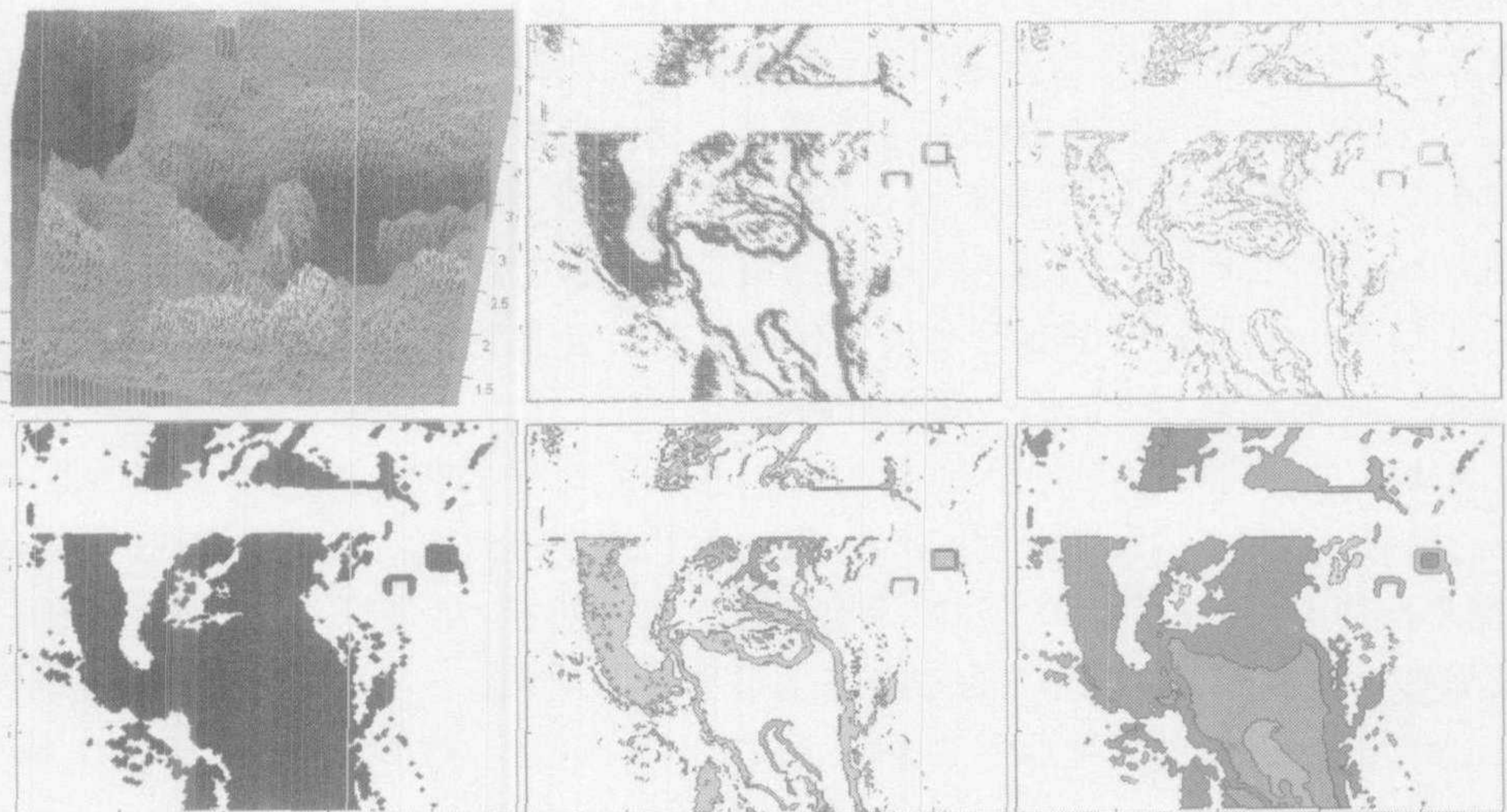


图 1 障碍结构图的产生过程

Fig. 1 Produce of constructed obstacle maps

b) 增广平面障碍着色图

利用障碍轮廓点数据,并建立每一障碍轮廓数据的标识与色彩(或灰度)映象关系,对障

碍进行颜色填充操作得到图 1 右下所示的增广平面障碍着色图. 利用增广障碍着色图, 使我们可以通过扫描法快速得到与路径规划任务相关的障碍拓扑结构.

3 基本定义及定理

图 3 所示自然地形是指由简单曲面组成, 且关于重力方向是单调的. 基本术语含义如图 2 所示, 定义如下.

定义 1. 平面障碍 o 是轮廓连续且由简单封闭曲线构成的平面图形. 可由一定粒度的按顺时针排列的轮廓点坐标近似表示.

定义 2. 视点 v 在着色图中是观察点, 包括视阻点 b 、视阻前点 f 、视止点 e 、起点 S 及终点 T . 视点又称候选站点.

定义 3. 在着色图中, 视点若相对某一障碍轮廓点四限象角大于 2π , 则此障碍相对此视点是复杂障碍, 否则为简单障碍.

定义 4. 视阻点 b 在着色图中是视线与障碍轮廓的切点. 对于简单障碍, 是与该视点所构成的有向直线的最大或最小四象限角所对应的轮廓点 (相对非视阻前点的任一障碍视阻点有且只有两个). 复杂障碍可按每 2π 分解为可数个连续曲线段组成的轮廓, 满足可视性的局部极值点为视阻点. 对于复杂障碍, 视阻点可有多.

定义 5. 视止点 e 在着色图中是经视阻点的有向视线的延长线与另一障碍的交点.

定义 6. 视阻线 Lb 在着色图中是视点到视阻点之间的直线段.

定义 7. 视止线 Le 在着色图中是视点到视止点之间的直线段.

定义 8. 视阻线粒度 lg 在着色图中是人为规定的视阻线的最短长度. 由路径规划精度要求决定 (例可选为障碍轮廓线长度的 $1/20$).

定义 9. 视阻前点 f : 在着色图中, 若视阻线短于视阻线粒度, 则按前一视阻线延长一视阻线粒度单位得到一点便是视阻前点, 该视阻线的视阻点称为该视阻前点的生成视阻点 (相对视阻前点的视点, 简单障碍的视阻点有且只有一个, 其为两切点中不为该视阻前点的另一个).

定义 10. 视阻前线 Lf 在着色图中是视阻点到视阻前点之间的直线段.

定义 11. 可行路段 P_s 是地形表面上任一满足指定梯度约束的曲线段. 视阻线、视阻前线、视止线分别对应地形表面的一条可行路段.

定义 12. 可达路径 P 是连接起点与终点, 由一组有序的可行路段组成的通路. 在着色图中可达路径记为 P , 称为平面可达路径, 其由着色图中得到的站点序列构成的相继线段组成. 在地形曲面上可达路径记为 S , 称为地形曲面可达路径, 它由经平面可达路径的垂面与地形曲面的交线构成. 着色图中的站点与地形曲面上的站点一一对应, 并称为地形曲面站点. 在三维 (地形) 空间由相继地形曲面站点构成的直线段组成的可达路径记为 L , 称为地形空间可达路径.

定理 1. 对于三维路径规划问题, 地形曲面上可行路径的最陡坡度上下限为 $\pm 30^\circ$ (由轮式月球车机动性能决定), 在着色图中利用自主行为路径规划方法在平面障碍图中进行站点搜索得到平面可达路径, 真实路径长度由对应的地形曲面可达路径计算, 估计路径长度由对应的地形空间可达路径计算, 则真实路径长度与估计的路径相比, 最大误差约为 15.47% ,

最大平均估计误差约为 4.9%。

证明. 由于三维空间地形是简单曲面组成的, 它相对水平面垂线是单调的, 平面可达路径、地形曲面可达路径、地形空间可达路径一一对应, 平面可达路径 $P=p_1+p_2+\dots+p_k$, 地形曲面可达路径 $S=s_1+s_2+\dots+s_k$, 地形空间可达路径 $L=l_1+l_2+\dots+l_k$. 如图 3 所示, 可达路径 L 起点为 l_0 , 终点为 l_f 对应的平面可行路段 p_i 、地形曲面可行路段 s_i 、地形空间可行路段 l_i 在同一水平面的垂面内, 记 s_i 与 p_i 之间夹角为 α , l_i 与 p_i 之间夹角为 β . 其中 $-30^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, $30^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$. 对任一可行路段有

$$\begin{aligned} \because p_i &\leq l_i = \int_{l_0}^{l_f} f(l) dl = \int_{l_0}^{l_f} \sqrt{1 + (\tan\alpha)^2} dl \leq \int_{l_0}^{l_f} \sqrt{1 + (\tan 30^\circ)^2} dl = \sqrt{4/3} p_i \leq s_i \\ \therefore (s_i - l_i) / l_i &\leq (s_i - p_i) / p_i \leq \sqrt{4/3} - 1 \approx 15.47\%, \\ \therefore (S - L) / L &= \left(\sum_1^k s_i - \sum_1^k l_i \right) / \sum_1^k l_i \leq \sqrt{4/3} - 1 \approx 15.47\% \\ \because p_i &\leq l_i = \int_{l_0}^{l_f} f(l) dl = \int_{l_0}^{l_f} \sqrt{1 + (\tan\beta)^2} dl = \sqrt{1 + (\tan\beta)^2} p_i \\ \therefore (s_i - l_i) / l_i &= \int_{l_0}^{l_f} \left(\sqrt{1 + (\tan\alpha)^2} / \sqrt{1 + (\tan\beta)^2} \right) dl - 1 \leq \sqrt{1 + (\tan 30^\circ)^2} / \sqrt{1 + (\tan\beta)^2} - 1 \\ \therefore E((S - L) / L) &= E\left(\left(\sum_1^k s_i - \sum_1^k l_i \right) / \sum_1^k l_i \right) \leq \\ &(3/\pi) \cdot \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{1 + (\tan 30^\circ)^2} / \sqrt{1 + (\tan\beta)^2} d\beta - 1 = (6/\pi) \cdot (\ln(\sec\beta - \tan\beta) \Big|_{-\pi/6}^{\pi/6}) - 1 \approx 4.9\% \end{aligned}$$

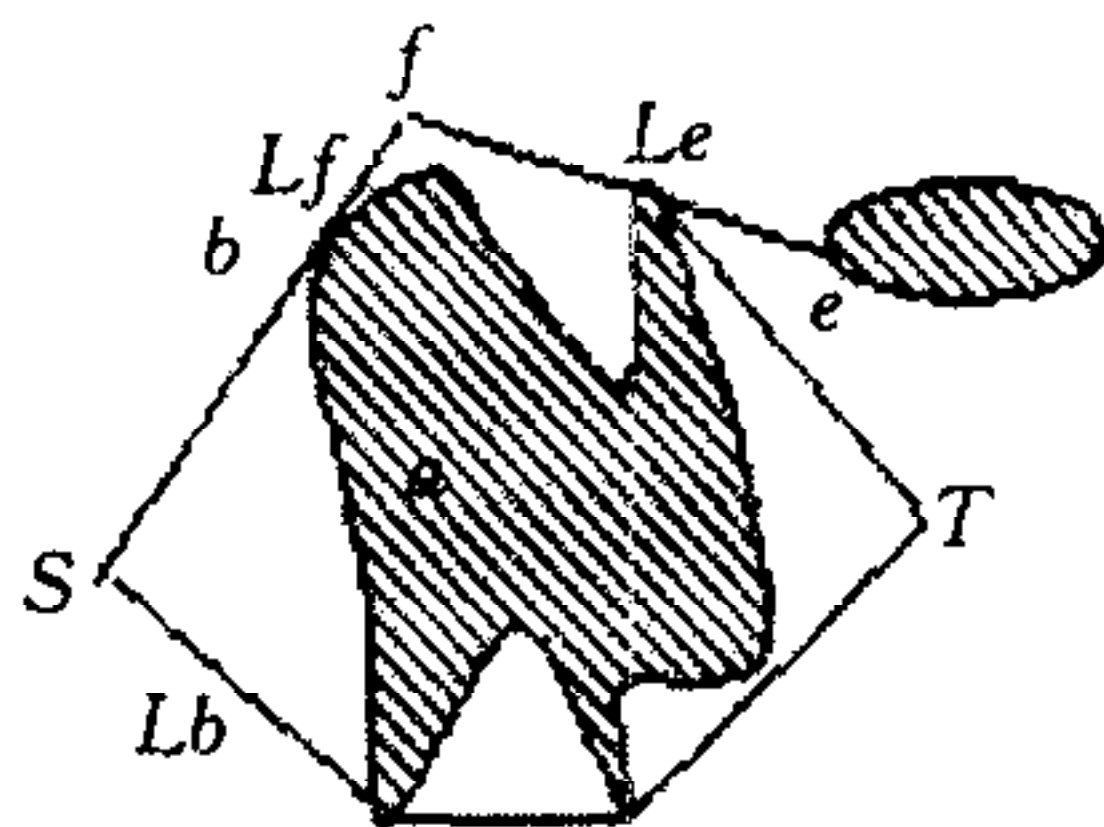


图 2 基本术语定义
Fig. 2 Basic terms definition

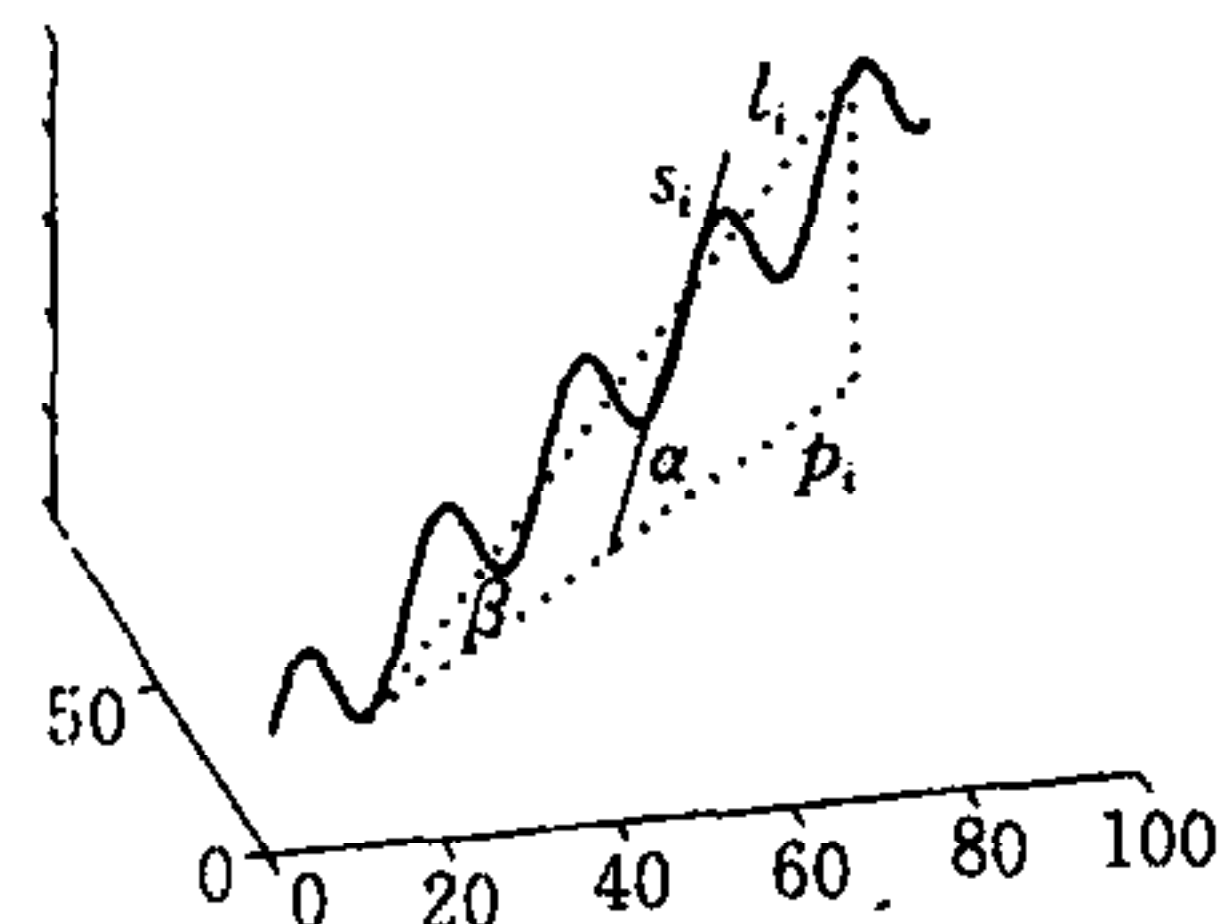


图 3 可行路段相互关系
Fig. 3 Relationship of path sections

4 自主行为路径规划算法

自主行为路径规划就是在着色障碍图中自动构造拓扑结构, 并计算最佳路径. 由平面障碍着色图中路径站点得到地形空间可达路径站点, 计算每一可行路径长度, 并找出最短路径. 自主行为路径规划算法的拓扑构造过程由相关障碍判别行为、视阻点判别行为、视阻前点判别行为、视止点判别行为、可视性判别行为、障碍判别行为、路径规划行为等共同实现.

着色图由 $[0.2 * (1 + \text{fix}(i/25)), 0.2 * (1 + \text{fix}(\text{mod}(i, 25)/5)), 0.2 * (1 + \text{mod}(i, 5))]$ 得障碍号 i 对应的障碍填冲的 rgb 值, 障碍判别行为是其逆过程. 相关障碍判别行为运用像素扫描给定两视点间线段的像素, 并判断属那一障碍. 视阻点判别行为、视阻前点判别行为在对复杂障碍进行分解后求障碍轮廓四象限角极值点. 视止点判别行为运用像素扫描法可判断视止点. 路径规划行为在拓扑图中搜索最短路径, 与文献[3]一样运用遗传算法能显著提高搜索效率.

由这一组基本行为构造的拓扑图在通道搜索时能够区分哪些障碍与路径规划任务是相关的,该拓扑结构中每一可行通道是一类可行通道的最优通道.因此,该拓扑构建过程便是局部最优通道的搜索过程,且通道数由与路径相关的障碍总数决定.

由定理 1 可知,运用自主行为路径规划解决月球车在坡度上下限为 $\pm 30^\circ$ 的路径规划是合理的,其优点在于自主行为路径规划方法具有自适应选择相关障碍、路径站点搜索具有趋向终点的方向性、对障碍轮廓点具有自适应选择能力.在计算时间上它与障碍轮廓点数成比例,与相关障碍数目具有指数计算时间关系,而不与所有参与规划的所有障碍的数目成指数关系.

5 系统仿真

系统仿真由月球车自主避障行为、自主路径规划行为、动力学控制系统、实时动画系统组成.图 4 和 5 是具有路径规划的月球车避障结果,相邻站点间的轨迹由自主避障行为控制产生,其在平面障碍图中的平动及转动速度分量投影到月球车体坐标系下作为月球车平动及转动速度控制量,从而得到图 3 中有自然环境下的轨迹.图 6 和 7 给出了两个不同起始点的路径搜索结果,其路径搜索时间分别为 0.2s 和 3s(计算机主频为 800M,像素为 512×512 ,障碍轮廓点数为 9878),自主行为路径规划方法的运算速度与路径规划所要求的精度密切相关,误差约 7% 以下时,计算时间有按多项式计算时间变化的趋势.大量仿真表明自

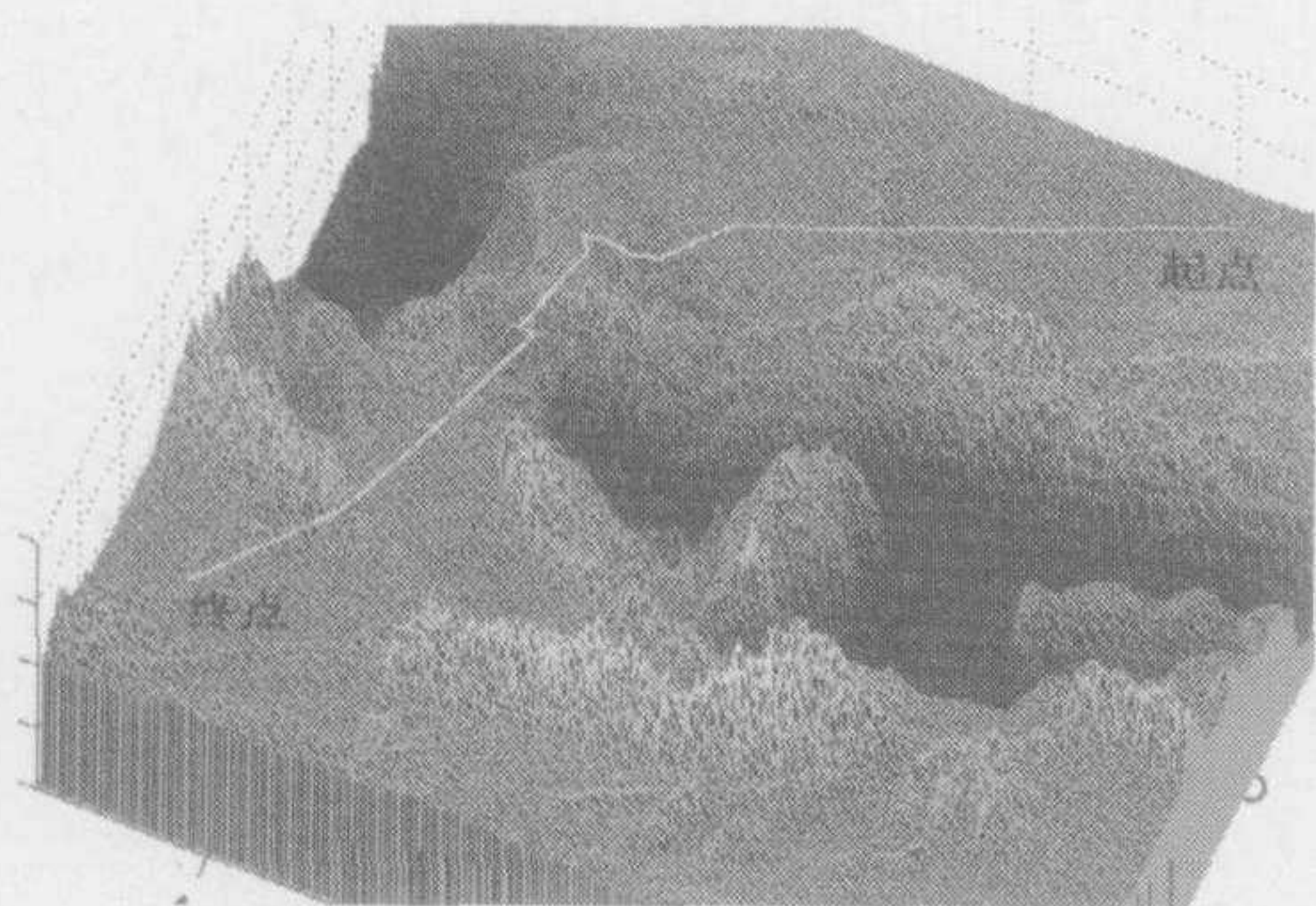


图 4 真实环境下月球车路径规划仿真

Fig. 4 Lunar rover path-planning in real world

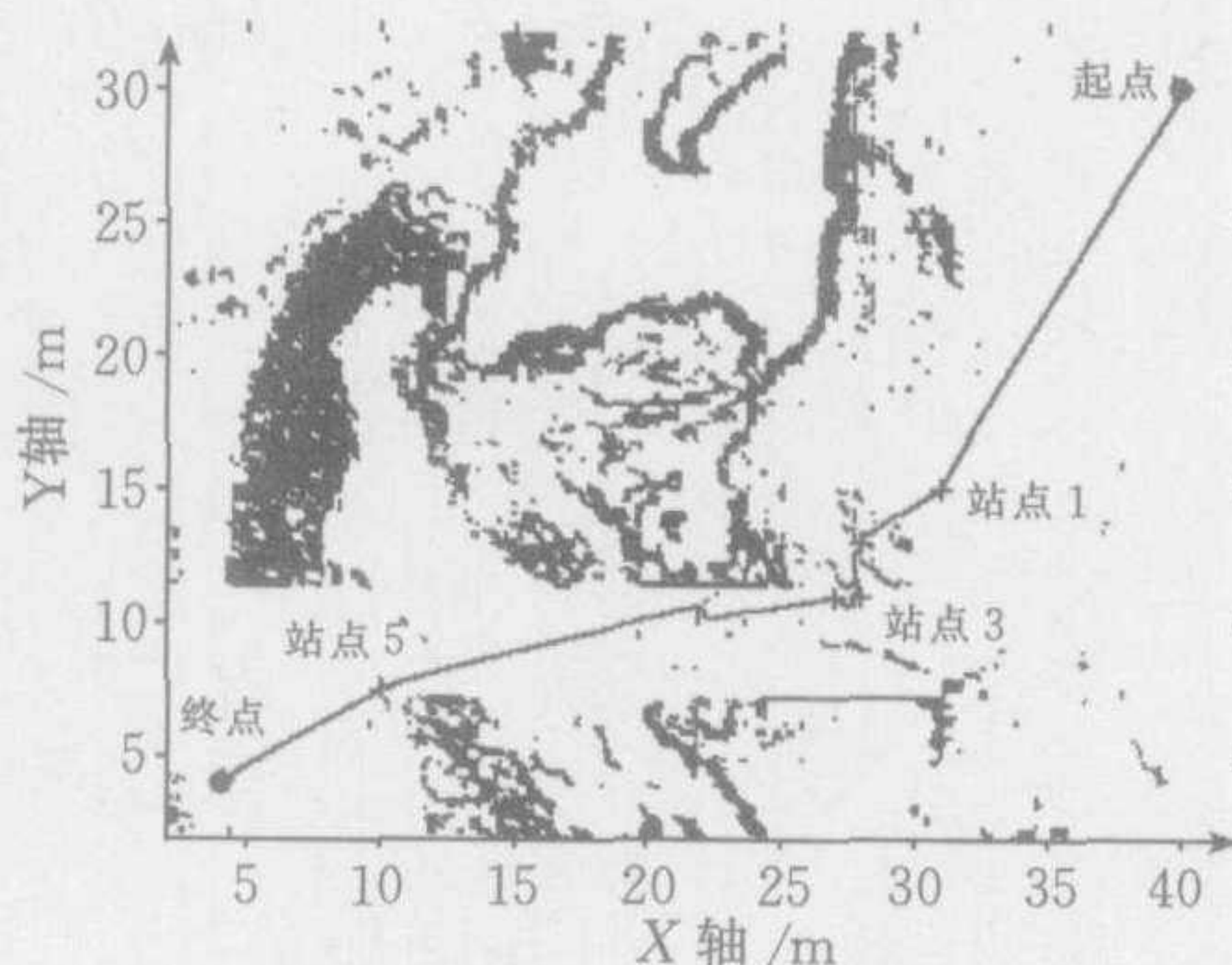


图 5 在障碍图中月球车路径规划

Fig. 5 Lunar rover path-planning in obstacle graph

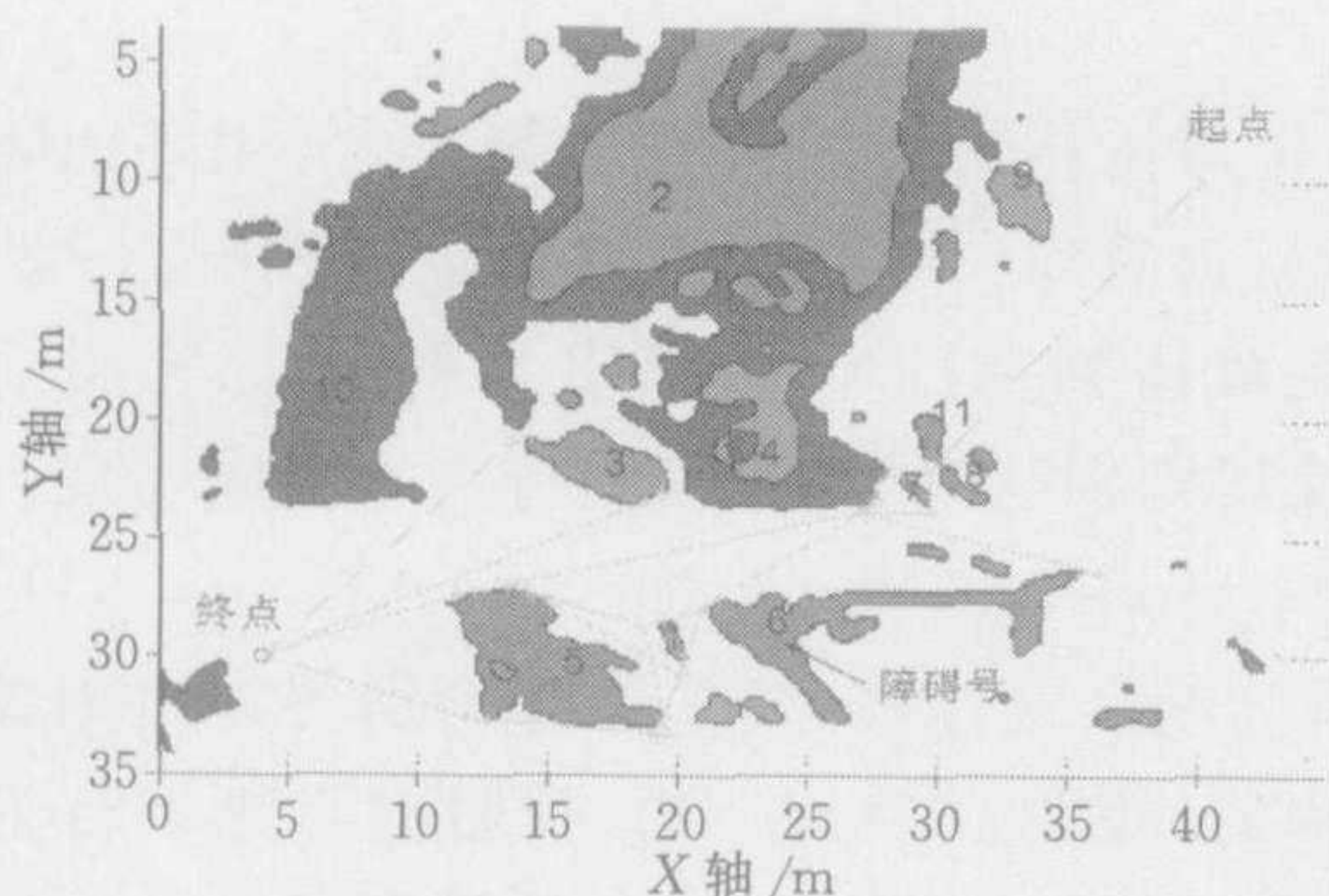


图 6 在着色图下可行路径搜索仿真 1

Fig. 6 No. 1 path searching in colored graph

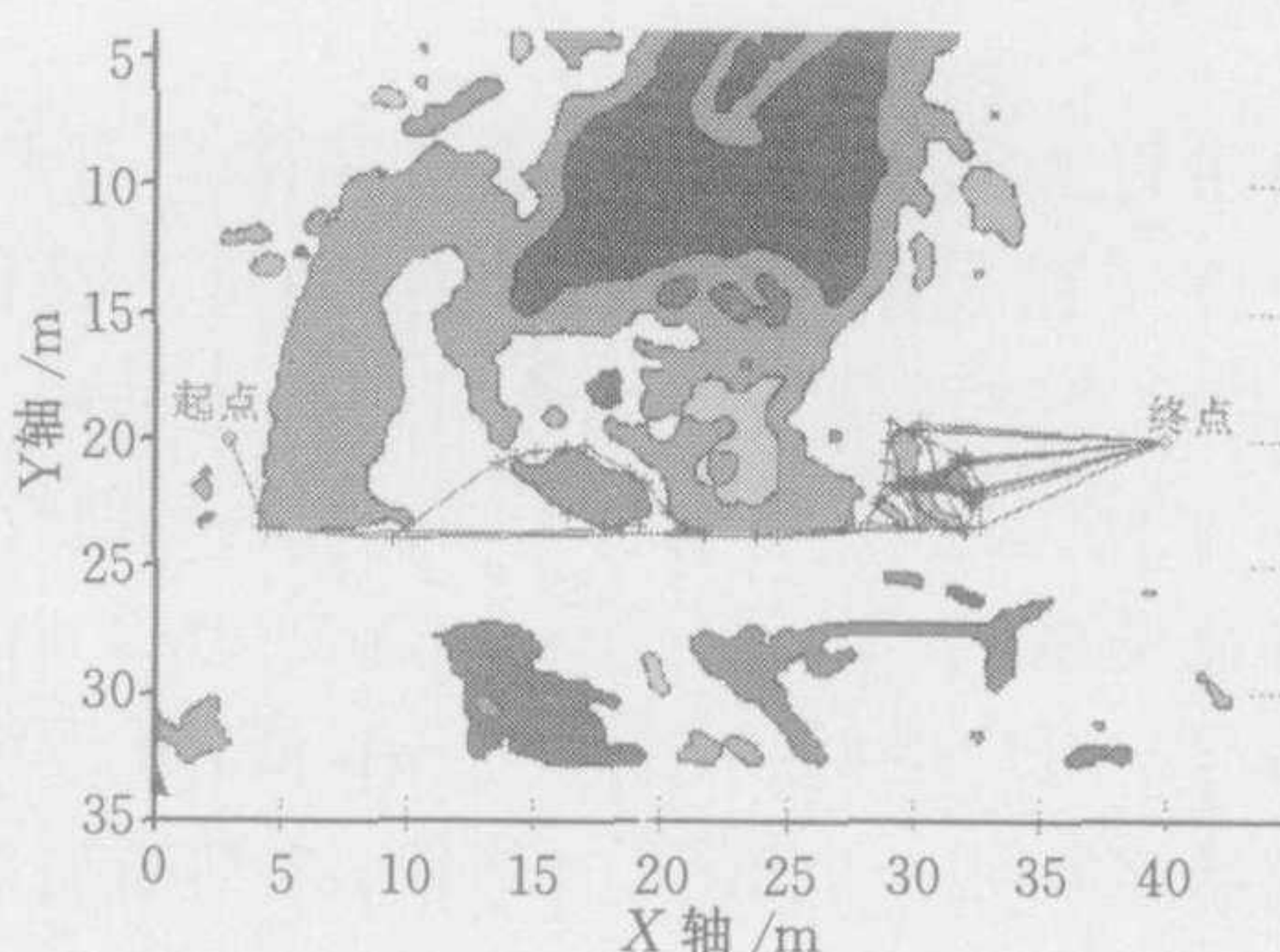


图 7 在着色图下可行路径搜索仿真 2

Fig. 7 No. 2 path searching in colored graph

主路径规划方法得到的最优路径与人的判断结果非常相似. 该路程规划方法与基于计算几何的路径规划方法相比, 具有很快的规划速度.

6 结论

自主行为路径规划方法适合于大范围自然环境下的路径规划问题, 具有快速的规划速度. 与基于自主行为月球车避障方法一起, 在满足月球车机动性及月面传送性的条件下, 能够实时地进行月球车运动规划.

References

- 1 Ju He-Hua, Cui Ping-Yuan, Cui Hua-Tao. Autonomous behavior-based Micro-Rover for Lunar exploration. In: Proceedings of 2001 International workshop on bio-robotics and teleoperation. Beijing: 2001. 325~331
- 2 Alex Yahja , Sanjiv Singh, Anthony Stentz. An efficient on-line path planner for outdoor mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, **32**(3): 129~143
- 3 Sun Shu-Dong, Lin Mao. Path planning of multi-mobile robots using genetic algorithms. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(5): 672~676(in Chinese)
- 4 Ju He-Hua, Cui Ping-Yuan, Cui Hu-Tao. Research on behavior-based lunar rover obstacle-avoiding technology. *A Journal of Chinese Association of Automation Information and Control*, 2002, **31**(7): 704~707(in Chinese)
- 5 Sharon L Laubach, Joel Burdick. An autonomous path planner implemented on the rocky7 prototype microrover. In: Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium; May 16~20, 1998. 292~297

居鹤华 博士, 现工作于北京工业大学. 研究领域为智能控制、自主机器人、飞行器控制.

(**JU He-Hua** Received Ph. D. degree in 2003, now he works in Beijing University of Technology. Research field includes intelligent control, autonomous robot, spacecraft control.)

崔平远 教授, 博士生导师. 研究领域为智能控制、自主机器人、飞行器控制.

(**CUI Ping-Yuan** Professor, Ph. D. supervisor. Research field includes intelligent control, autonomous robot, spacecraft control.)