

文章编号: 1002 0446(2006) 03 0275 04

基于激光雷达的室外移动机器人避障与导航新方法^{*}

李云翀, 何克忠

(北京清华大学智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 提出了一种应用于室外移动机器人避障与导航的新方法——角度势场法. 此方法将当前视场极坐标系的二维障碍物信息转换到一维的角度域内, 综合评估视场内的障碍物在角度域内产生的阻力效应, 以及目标点在角度域内产生的引力效应, 计算得出当前目标角度及通行函数, 确定移动机器人驾驶角和速度的控制输出, 做到兼顾移动机器人的安全与向目标点的行进. 此方法已应用于室外移动机器人 THMR-V.

关键词: 室外移动机器人; 避障; 导航; 角度势场法

中图分类号: TP 24 **文献标识码:** B

A Novel Obstacle Avoidance and Navigation Method for Outdoor Mobile Robot Based on Laser Radar

LI Yun-chong HE Ke-zhong

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A novel method named Angle Potential Field method is presented for obstacle avoidance and navigation of outdoor mobile robot. With the method, the 2-dimension obstacle information in the polar coordinate space of current view scene is transformed to the 1-dimension angle field. Repulsive forces produced by obstacles and attractive forces produced by the object location are estimated integratively to calculate the pass function and the purpose angle, and the controlling output of steering angle and velocity of the mobile robot are determined. As thus, both the safety of the robot and the approach to the object location are considered. The method has been applied to our outdoor mobile robot THMR-V.

Keywords outdoor mobile robot; obstacle avoidance; navigation; angle potential field method

1 引言 (Introduction)

THMR-V 是清华大学智能技术与系统国家重点实验室独立开发的室外移动机器人. 它装备了双目视觉摄像机、激光雷达、GPS 接收机、磁罗盘、光码盘等传感器, 具有结构及非结构化道路自动驾驶、遥控驾驶的能力.

非结构化道路自动驾驶的实现原理如图 1 所示, 其中虚线框部分是本文的讨论范围.

避障与导航是实现自动驾驶的重要环节, 它根据规划出的路径和实时的道路及障碍物情况, 给出移动机器人的控制决策.

实现避障与导航的必要条件是环境感知. 近年来, 激光雷达在移动机器人导航中的应用日益增多. 这主要是由于基于激光的距离测量技术具有很多优

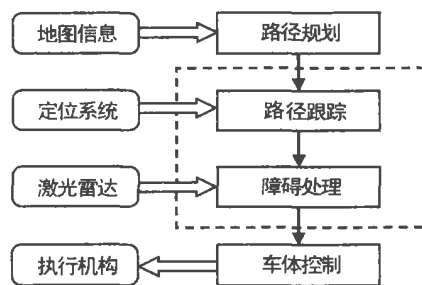


图 1 非结构化道路自动驾驶原理

Fig 1 Diagram of autonomous driving on unstructured road

点, 特别是其具有较高的精度. 通过二维或三维扫描的激光束或光平面, 激光雷达能够以较高的频率提供大量的、准确的距离信息. 激光雷达与其它距离传感器相比, 能够同时考虑精度要求和速度要求, 这一

* 收稿日期: 2005-05-18

点特别适用于移动机器人领域. 此外, 激光雷达不仅可以有环境光的情况下工作, 也可以在黑暗中工作, 而且在黑暗中测量效果更好. THMR-V 使用二维扫描激光雷达作为重要的环境感知工具.

2 相关研究 (Relative research)

Khatib^[1] 提出了人工势场法 (Potential Field Method PFM), 用于解决移动机器人实时避障的问题. 势场法的基本思想是认为移动机器人的移动空间是一个力场, 目标点产生引力, 障碍物产生斥力, 机器人在引力和斥力的合力作用下移动. 势场法自提出后得到了广泛的应用与发展. 杨明^[2] 考虑到移动机器人的动态环境, 提出了时变势场法, 并应用于 THMR-V 的避障与导航.

Borenstein^[3] 指出了势场法存在的问题: 由于把所有的信息都归结为一个单一的合力, 从而过多地丢失了局部环境的有效信息. 为解决这一问题, 他提出了向量场直方图法 (Vector Field Histogram method VFH), 此方法建立以移动机器人为中心的极坐标系, 将障碍物对机器人的影响量化为各个角度上的障碍强度值, 在障碍物强度值低于阈值的角度范围内选择移动方向. VFH 法被继续改进为 VFH+^[4] 和 VFH*^[5] 方法. 在 VFH 方法之后, Feiten^[6] 提出了参数化路径族方法 (Parameterized Path Families PPF), Simmons^[7] 提出了曲率速度法 (Curvature Velocity Method CVM). 在 THMR-V 上, 李华^[8] 实现了与 VFH 法相似的最宽无障碍区法.

VFH 法的一个弱点是对阈值敏感, 阈值过小时一些可行通道将被忽略, 阈值过大则可能造成擦碰障碍物的危险. 另外, VFH 法无法区分不同通道的性能, 而且容易陷入局部的“死区”.

针对室外移动机器人 THMR-V 避障与导航的具体情况, 本文提出一种广义的势场类方法——角度势场法 (Angle Potential Field VPf). 此方法综合考虑了距离不同的障碍物及目标点对机器人的影响, 较好地解决了上述算法存在的问题.

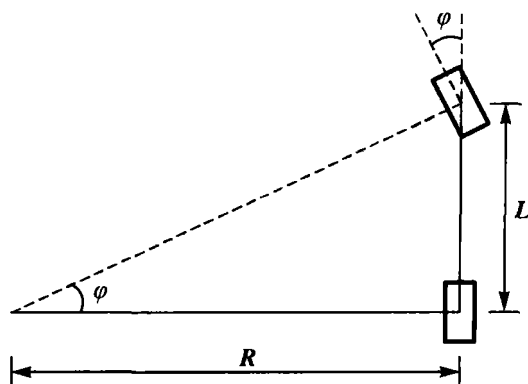
3 角度势场法 (Angle potential field method)

避障与导航算法最重要的原则是保证车辆的安全移动, 移动机器人必须能及时准确地发现障碍物并做出正确的躲避或停车动作. 在此前提下, 向路径规划模块中给出的目标点行进. 类似向量场直方图法, 角度势场法以机器人当前视场视线角度为论域, 将视场极坐标系的二维障碍物信息转换到一维的角

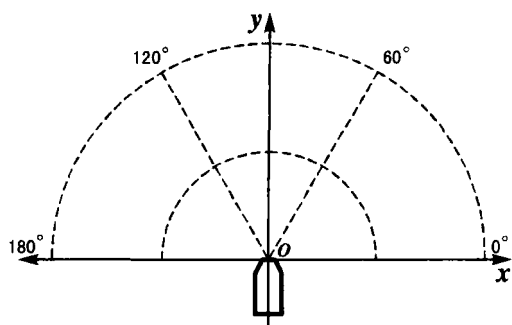
度域内. 综合评估视场内的障碍物在角度域内产生的阻力效应, 以及目标点在角度域内产生的引力效应, 得出当前状态的目标角度.

3.1 车辆模型与车体坐标系

移动机器人 THMR-V 采用四轮汽车底盘作为机械平台, 后轮驱动, 前轮导向. 在车速不是太快而转弯半径较大时, 可以近似为两轮自行车模型. 可以建立以车头激光雷达发射点为原点的车体极坐标系, 如图 2 所示.



(a) 车体模型



(b) 车体坐标系

图 2 移动机器人车体模型与车体坐标系

Fig. 2 Model and coordinate systems of mobile robot

车体坐标系中 ρ 方向 (径向) 为完整自由度, θ 方向 (横向) 为不完整自由度. 因此障碍物对移动机器人的影响, 在径向和横向方向上也不一致. 我们设定横向安全距离 D_{sf} 为移动机器人能够安全通过障碍物时与障碍物的横向距离, 径向安全距离 $D_{sr}(v)$ 为移动机器人以速率 v 行驶状态开始减速到静止状态所移动的距离.

$$D_{sf} = k_{sf} \cdot \frac{1}{2} \cdot W = \frac{1}{2} k_{sf} W$$

$$D_{sr}(v) = k_{sr} \cdot \frac{1}{2} \cdot v \cdot \frac{v}{-a} = \frac{-k_{sr} v^2}{2a}$$

其中, W 为车体宽度; α 为车辆正常减速时的加速度;
 k_{sf} k_{sr} 是放大系数, k_{sf} $k_{sr}>1$

3 2 阻力场

阻力场由视场范围内某个角度上的障碍物产生, 阻力随障碍物距离的减小而增大. 同时, 障碍物所在角度左右的危险角度范围内, 都由于此障碍物的存在而产生阻力. 为简化计算, 使用平台函数描述某一角度障碍点在角度域上产生的阻力, 对于角度 φ 的障碍点在角度 θ 产生的阻力定义如下:

$$k_{RF}(\varphi, \theta) = \begin{cases} k_p(\varphi), & \varphi - \delta(\varphi) \leq \theta \leq \varphi + \delta(\varphi) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$
$$k_p(\varphi) = \begin{cases} +\infty, & d(\varphi) \leq D_{sr} \\ \frac{1}{d(\varphi) - D_{sr}(v)}, & D_{sr}(v) < d(\varphi) \leq D_m \\ \frac{1}{D_m - D_{sr}(v)}, & d(\varphi) > D_m \end{cases}$$
$$\delta(\varphi) = \arcsin\left(\frac{D_{sf}}{d(\varphi)}\right)$$

其中, $d(\varphi)$ 为角度 φ 的障碍点距离; D_m 为设定的最大评估距离, 超出 D_m 的障碍物均产生最小阻力值.

对于视场中某一角度 θ 总阻力设定为各角度的障碍点在角度 θ 产生的阻力的最大值. 阻力场函数可以表示为下式, 如图 3 所示:

$$K_{RF}(\theta) = \max_{\varphi \in [0, \pi]} (k_{RF}(\varphi, \theta))$$

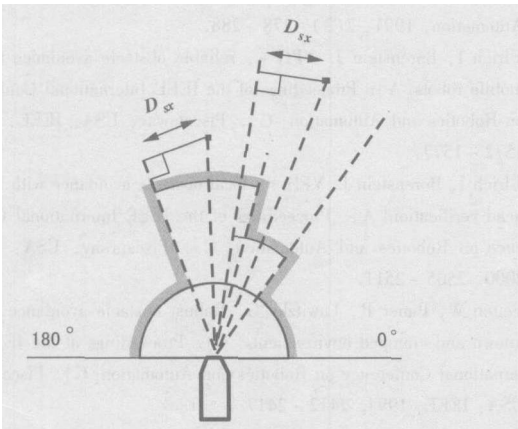


图 3 角度域上产生的阻力
Fig 3 Repulsive forces on angle field

3 3 引力场

以上所述的阻力场用来描述视场内障碍物对移动机器人的影响. 而为了引导移动机器人向规划目标点移动, 需要考虑目标点所产生的引力场. 这里我

们采用余弦函数定义目标点在各角度上产生的引力:

$$K_{AF}(\theta) = \cos(\theta - \theta_{obj})$$

其中 θ_{obj} 为目标点在当前视场中的方向角.

使用余弦函数定义引力场, 一方面, 在计算角度与目标方向角差值 (即 $\theta - \theta_{obj}$) 比较大时, 场强变化比较明显, 能引导移动机器人尽快朝向目标方向; 另一方面, 在计算角度与目标方向角差值比较小时, 场强变化不明显, 在大方向正确的情况下, 避免机器人被目标点过度吸引以致影响到对障碍物的躲避.

3 4 通行函数

对于视场中某一角度 α 定义通行函数为阻力的倒数与引力数值之乘积. 它描述了机器人在这一角度上通过并向目标点前进的可能性. 所有角度的通行函数的最大值定义为当前视场的通行函数. 它描述了在当前视场下机器人通过障碍物并向目标点前进的可能性.

$$K_p(\theta) = \frac{K_{GF}(\theta)}{K_{RF}(\theta)}$$
$$K_{FG} = \max_{\theta \in [0, \pi]} (K_p(\theta))$$

图 4 所示为一帧仿真场景的通行函数. 其中内部黑色实线描述障碍物距离, 外部灰色实线描述通行函数值.

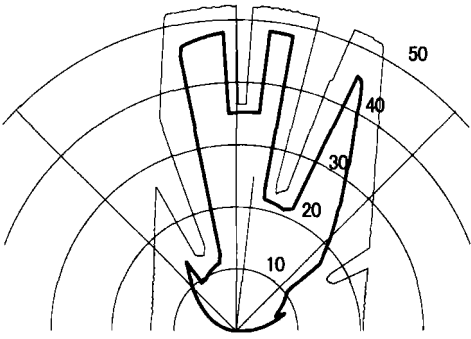


图 4 一帧仿真场景的通行函数
Fig 4 Pass function of a simulative scene

3 5 决策输出

决策输出规则如下:

- (1) 当 K_{PG} 等于 0 时, 减速停车.
- (2) 当 K_{PG} 大于 0 时, 选择 $K_p(\alpha)$ 最大的角度作为角度输出 θ_{out} ;

设最大限速为 v_{max} , 最小限速为 v_{min} , 则使用以下规则确定速度输出 v_{out} :

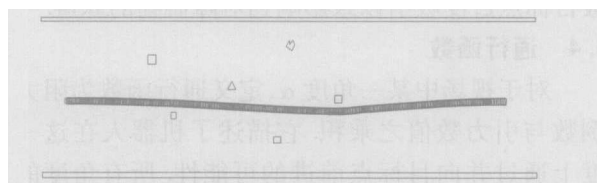
$$v_{out} = (v_{max} - v_{min}) \times \frac{K_{PG}}{K_{PGmax}} + v_{min}$$

$$K_{PGmax} = D_m - D_{sr}v_{min}$$

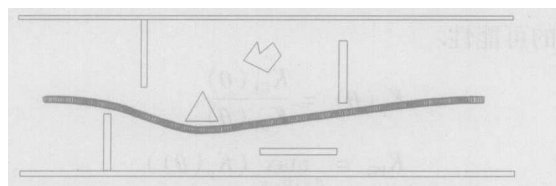
以上得到的 θ_{out} 及 v_{out} 作为 THM R-V 的驾驶角及速度的控制目标。

4 仿真及实验结果 (Results of simulations and experiments)

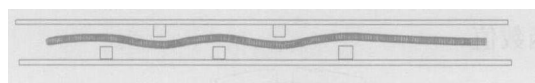
在几种不同的环境与障碍物条件下使用角度势场法进行仿真, 结果如图 5 所示。可以看出, 角度势场法在不同环境条件下均有较好的性能。



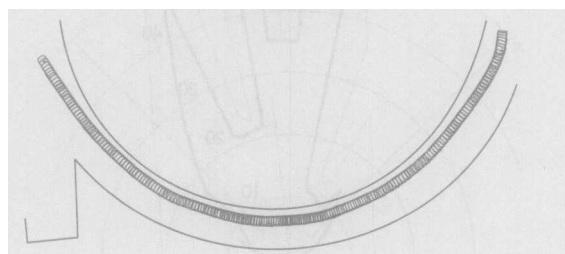
(a) 宽阔空间稀疏障碍物



(b) 宽阔空间密集障碍物



(c) 狭窄空间



(d) 弯道

图 5 仿真结果

Fig 5 Results of simulation

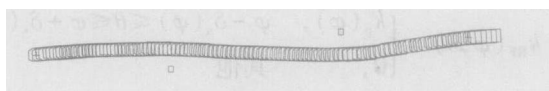
角度势场法也在 THM R-V 上进行了实际测试, 实验结果如图 6 所示, 避障与导航性能优于之前所使用的时变势场法和最宽无障碍区法。

5 结论与展望 (Conclusion and prospect)

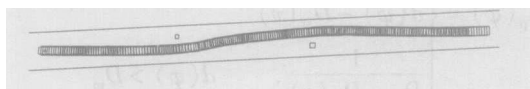
本文提出了一种基于激光雷达的移动机器人避障与导航方法——角度势场法。此算法考虑了室外移动机器人的运动学限制, 对障碍物在径向和侧向产生的影响区别对待。除了目标位置之外, 此算法不

需要任何全局信息, 并且不存在阈值敏感性问题, 因而对环境的复杂变化具有良好的适应性。另外, 此算法直观明确, 接近于人工驾驶的思路, 使移动机器人具有类人的决策方针。角度势场法在仿真和实验中表现出了良好的性能。

目前的算法中, 只考虑到了单点规划直线路径 (只给定一个目标点) 的情况, 在进一步的研究中, 将考虑到多点规划多参数路径 (有多个途经目标点, 某段路径可能规划为圆弧或其他参数曲线)。



(a) 开阔空间



(b) 道路

图 6 实验结果

Fig 6 Results of experiments

参考文献 (References)

- [1] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway USA: IEEE, 1985. 500-505.
- [2] 杨明, 王宏, 何克忠, 等. 基于激光雷达的移动机器人环境建模与避障 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2000, 40(7): 112-116.
- [3] Borenstein J, Koren Y. The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 278-288.
- [4] Ulrich J, Borenstein J. VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway USA: IEEE, 1998. 1572-1577.
- [5] Ulrich J, Borenstein J. VFH*: local obstacle avoidance with look-ahead verification [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway USA: IEEE, 2000. 2505-2511.
- [6] Feiten W, Bauer R, Lawitzky G. Robust obstacle avoidance in unknown and cramped environments [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway USA: IEEE, 1994. 2412-2417.
- [7] Simmons R. The curvature velocity method for local obstacle avoidance [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway USA: IEEE, 1996. 3375-3382.
- [8] 李华, 丁冬花, 何克忠. THM R-V 导航控制算法的研究 [J]. 机器人, 2001, 23(6): 525-530.

作者简介:

李云卿 (1977), 男, 博士生, 研究领域: 移动机器人, 人工智能。
何克忠 (1936), 男, 教授, 研究领域: 计算机控制, 移动机器人。