

文章编号: 1002-0446(2004)06-0548-05

基于模糊控制的自主机器人路径规划策略研究*

付宜利, 顾晓宇, 王树国

(哈尔滨工业大学现代生产技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 结合人类的经验及模糊控制理论研究移动机器人的局部路径规划问题, 采用步长的转向角控制的方法模拟驾车减速的自然过程, 同时采用了虚拟目标点的方法处理局部路径规划中经常出现的陷阱问题. 仿真结果验证了所提方法的有效性和可行性.

关键词: 移动机器人; 模糊控制; 陷阱摆脱; 路径规划

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

A Fuzzy Control Based Path Planning Strategy for Autonomous Robot

FU Yi li, GU Xiaoyu, WANG Shuguo

(Advanced Manufacturing Technology Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A local path planning method for mobile robot using both fuzzy control theory and human experience is introduced. A way of "turning angle controlled step" is used to simulate the natural driving speed down process of human beings. A method of "virtual target" is introduced to deal with the problem of local minimum, which often occurs in local path planning. The result of the simulation experiment proves the effectiveness and feasibility of the way introduced.

Keywords: mobile robot; fuzzy control; trap escaping; path planning

1 引言(Introduction)

自主导航能力是移动机器人智能化程度的重要标志, 是实现其在未知环境中自主工作的基本前提.

路径规划的方法分为两种: 一种是全局路径规划, 它基于环境先验完全信息; 另一种是局部路径规划, 它依赖于传感器的信息. 后者环境是未知或部分未知的, 即障碍物的尺寸、形状和位置等信息必须通过传感器获得. 全局路径规划需要大量的计算以建立环境模型, 并且导航过程中需要机器人不断地确定自身相对于环境的位置. 由于环境信息中的不确定因素, 此方法有时难以实现. 目前国内外研究机器人路径规划的方法中以人工势场法^[1]较为成熟. 该方法的优点在于无需大量的计算, 自动产生较光滑的路径, 并且由于使用局部信息, 可以满足实时运行要求. 但由于势场法把所有信息压缩成单个合力而损失部分有价值的局部障碍物分布的信息, 容易陷入局部最小而不能使机器人到达目标位置. 有些学者借鉴预测控制原理, 基于滚动窗口^[2]的规划方法

进行机器人的路径规划, 该方法使机器人在没有任何先验知识的环境中, 利用实时探知的局部环境信息实现实时避障, 但该方法对机器人所处环境有一定的要求. 另外, Iyengar 提出了一种基于学习的算法, 该方法的优点是这种学习是增量式的, 学习的成功率随着案例的增加而增加, 但该方法计算量大, 信息冗余多, 对机器人信息存储量要求高. 模糊逻辑法^[4,5]模拟驾驶员的驾驶思想, 将模糊控制本身所具有的鲁棒性与基于生理学上的“感知—动作”行为结合起来, 为移动机器人在未知环境中导航提出了一种新思路. 该方法避开了传统算法中存在的对移动机器人的定位精度敏感、对环境信息依赖性强的缺点, 并采用了相对定位的方法, 消除了累积误差, 同时使计算量保持在较低的水平上, 对处理未知环境下的规划问题, 显示了很大的优越性, 有较强的实时性, 且在一定程度上解决了局部最小问题. 对于只能提供近似的、不确定的信息数据的环境是非常有效的. 然而模糊控制理论用于机器人路径规划同样会出现局部最小问题. 本文基于“虚拟目标”的方法, 在

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA422240).
收稿日期: 2004-01-19

保持模糊控制原有特性的基础上给出了一种移动机器人路径规划及摆脱陷阱的方法. 仿真过程中, 在对隶属度函数中参数进行反复调整的基础上给出了相对合理的隶属度函数. 尝试了用转向角控制步长的方法, 避免了传统方法中的多维模糊处理问题, 仿真验证了该法的有效性.

2 基于模糊控制的路径规划 (Fuzzy control based path planning)

2.1 移动机器人模型及模糊隶属度函数的确定

如图 1 所示, 该机器人的外轮廓为近似圆形. 机器人的前端有两个驱动轮, 后部用一个辅助轮保持平衡, 同时使机器人绕其中心可以自由旋转. 另外机器人上还安装了 4 组传感器, 分别用来检测左侧、前方、右侧的障碍物距离以及获取目标方位信息. 在检测障碍物距离的 3 组传感器中分别取其所测得距离的最小值为该方向上障碍物距离值. 利用传感器测得值, 把目标方位信息、左、前、右距离信息作为输入量, 结合人类实际经验给出模糊推理规则, 选择合适的模糊推理方法, 得出机器人方向控制角作为输出量.

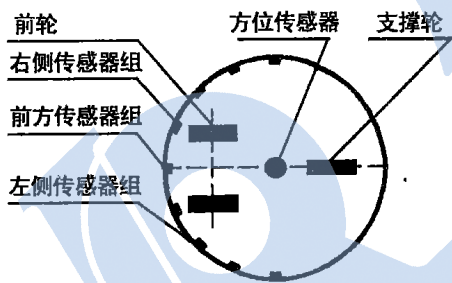


图 1 移动机器人模型

Fig. 1 The model of mobile robot

在模糊控制中用来进行模糊推理的是模糊变量, 而机器人所处环境中各方向的障碍物距离信息、目标方向信息都是具体的量, 因此存在一个转换的过程. 本文使用连续型论域, 采用简单线性化处理的方法, 将距离输入变量 dr 、 dc 、 dl 的论域划分为 {NEAR, FAR}; 将目标方位输入变量 tr 的论域划分为 {RB, RS, Z, LS, LB}; 将控制角输出变量 sa 的论域划分为 {TRB, TRS, TZ, TLS, TLB} (T: Turn, L: Left, R: Right, S: Small, B: Big). 结合人类的实际经验并在仿真的过程中对参数不断进行调整, 优化最终得到相应的隶属度函数. 限于篇幅, 本文仅给出图 2 中 a (开始认为距离为远的距离最小值) 从小变大时对仿真结果的影响, a 取得过小时, 导致机器人在

离障碍很近时才采取避障策略, 但此时机器人已经没有足够的距离调整, 最终撞上障碍物; a 取值大小合适时, 机器人成功经过图上侧的狭窄路径到达目标点; a 取得过大时, 导致机器人误认为图上侧的狭窄路径不可行, 最终机器人将经过图下侧较宽路径到达目的点; a 取值非常大时, 使机器人认为整个环境布满障碍物而时时处于避障状态且找不到可行路径, 最终算法将发散. 可以看出, a 取 1m 时效果最佳 (仿真使用障碍物分布同图 5, 仿真结果由于篇幅原因未给出), 最终给出距离变量 $dr/dc/dl$ 的隶属度函数如图 2. 方位角变量 tr 与输出控制角变量 sa 的隶属度函数如图 3、图 4 所示.

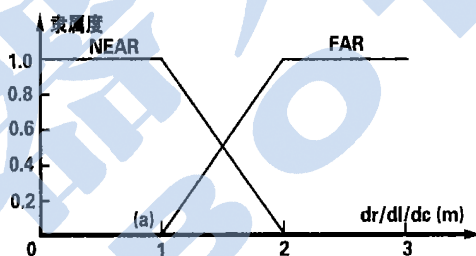


图 2 障碍物距离变量 $dr/dc/dl$ 的隶属度函数

Fig. 2 Membership functions of obstacle distance $dr/dc/dl$

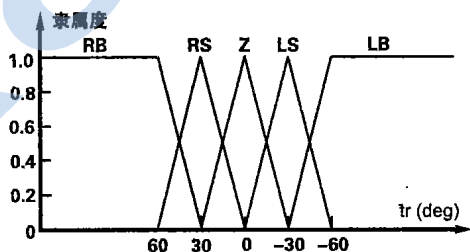


图 3 方位角变量 tr 的隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of target orientation tr

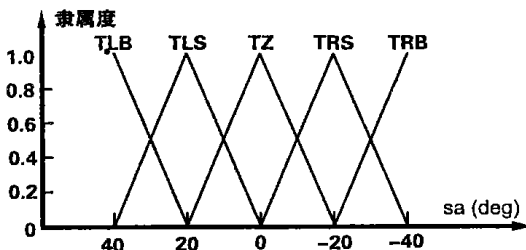


图 4 控制角变量 sa 的隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of turning angle sa

2.2 路径规划模糊控制规则的建立

本文将障碍物的方位分为左、前、右 3 类, 障碍物距离分为 NEAR、FAR 两类, 同时考虑到目标方位信息有 5 种, 因此输入信息可能出现的情况总数为 $2^3 \times 5 =$

40种.根据人类驾车的实际经验,当障碍物远时,目标方位角起主要控制作用,机器人将尽量对准目标前进;当障碍物近时,机器人根据障碍物分布结合目标方位做出合理决策,在保证避障的同时尽量靠近目标.借鉴人驾车时出现这40种情况时采取的策略,我们可以总结出40条控制规则,如表1所示.

表1 模糊控制规则表
Table 1 Fuzzy control rules

类别	规则号	d_r	d_c	d_l	tr	sa
I	1	FAR	FAR	FAR	LB	TLB
	2	FAR	FAR	FAR	LS	TLS
	3	FAR	FAR	FAR	Z	TZ
	4	FAR	FAR	FAR	RS	TRS
	5	FAR	FAR	FAR	RB	TRB
II	6	FAR	FAR	NEAR	LB	TZ
	7	FAR	FAR	NEAR	LS	TZ
	8	FAR	FAR	NEAR	Z	TZ
	9	FAR	FAR	NEAR	RS	TRS
	10	FAR	FAR	NEAR	RB	TRB
III	11	FAR	NEAR	NEAR	LB	TRS
	12	FAR	NEAR	NEAR	LS	TRS
	13	FAR	NEAR	NEAR	Z	TRS
	14	FAR	NEAR	NEAR	RS	TRB
	15	FAR	NEAR	NEAR	RB	TRB
IV	16	NEAR	NEAR	NEAR	LB	TRB or TLB
	17	NEAR	NEAR	NEAR	LS	TRB or TLB
	18	NEAR	NEAR	NEAR	Z	TRB or TLB
	19	NEAR	NEAR	NEAR	RS	TRB or TLB
	20	NEAR	NEAR	NEAR	RB	TRB or TLB
V	21	FAR	NEAR	FAR	LB	TRB
	22	FAR	NEAR	FAR	LS	TLS
	23	FAR	NEAR	FAR	Z	TRS or TLS
	24	FAR	NEAR	FAR	RS	TRS
	25	FAR	NEAR	FAR	RB	TRB
VI	26	NEAR	FAR	FAR	LB	TLB
	27	NEAR	FAR	FAR	LS	TLS
	28	NEAR	FAR	FAR	Z	TZ
	29	NEAR	FAR	FAR	RS	TZ
	30	NEAR	FAR	FAR	RB	TZ
VII	31	NEAR	NEAR	FAR	LB	TLB
	32	NEAR	NEAR	FAR	LS	TLB
	33	NEAR	NEAR	FAR	Z	TLS
	34	NEAR	NEAR	FAR	RS	TLS
	35	NEAR	NEAR	FAR	RB	TLS
VIII	36	NEAR	FAR	NEAR	LB	TLB
	37	NEAR	FAR	NEAR	LS	TZ
	38	NEAR	FAR	NEAR	Z	TZ
	39	NEAR	FAR	NEAR	RS	TZ
	40	NEAR	FAR	NEAR	RB	TRB

现仅对其中某些规则作一下解释,规则1~5号:此时各个方位障碍物均较远,目标方位将起主要作用,机器人调整方向以对准目标前进.规则16~20

号:此时各方向障碍物都较近,因此机器人可以选择从障碍左侧或右侧绕过障碍,与之相对应有两套不同的规则.在具体应用时16~20号规则的选择必须一致(均向右转或均向左转),否则由于规则作用相互抵消问题,在某些特殊障碍物面前可能失效.另外,这5条规则的选择对后面的陷阱克服策略有一定影响(下文有较详细论述).其余规则均可通过相似分析得出.

2.3 模糊处理过程

模糊处理的方法有很多种,本文采用模糊控制领域较为成熟的Mamdani模糊处理方法,其处理过程大致可分为模糊化、模糊推理、模糊合成、解模糊化4个步骤^[4].

2.4 机器人步长的转向角控制

移动机器人的步长对路径规划的结果起着重要的作用.步长过小,机器人信息处理系统没有足够时间来处理相邻两次采样信息,步长过大就会出现机器人“刹车”不及而碰到障碍物的情况,如图5所示,因此步长必须控制在合理的范围之内.同时在转弯处应该让机器人步长减小以使机器人获得足够反应步数.

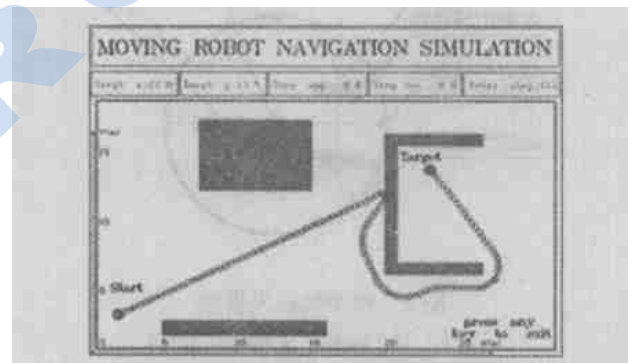


图5 步长取为40cm时仿真结果

Fig. 5 Simulation result when the step equals 40cm

一般而言,机器人步长与各方向障碍物距离及目标位置也可以用一套相应的模糊控制规则描述,但是这样模糊控制器将是多维输出,而且计算量会增大.实际上人类驾车转弯是一个自然减速的过程,而且有转弯越急车速越慢的结论.因此可以考虑用转向角来控制步长.为了方便计算,本文尝试取 30° 时步长减小为允许最大步长的一半的策略方法.

即取

$$\begin{cases} x = 0^\circ, & y = step \\ x = 30^\circ, & y = \frac{1}{2}step \end{cases}$$

设步长与转向角近似满足直线方程:

$$y = ax + b$$

则有: $a = -\frac{1}{60}step, b = step$

则两者近似关系为: $y = -\frac{1}{60}step \cdot x + step$

采用了上述手段后, 相当于给机器人装上了自动变速装置, 使机器人根据转角大小自动调整步长, 在一定程度上保证机器人在转弯处获得足够反应步数. 图 5 中机器人由于使用了该策略使之仅与障碍物“擦边”, 最终得以摆脱障碍. 可以想象, 此时稍稍减小步长就可保证无碰避障(最终效果见图 7、8).

3 陷阱克服策略(Trap escaping strategy)

陷阱克服问题在机器人路径规划领域已经研究了很久, 但该问题尚未完善解决. 其中最典型的是 U 型障碍物的情况. 应用前面的规则就会出现机器人将被困在 U 型区域内的情况, 路径规划仿真程序将出现死循环.

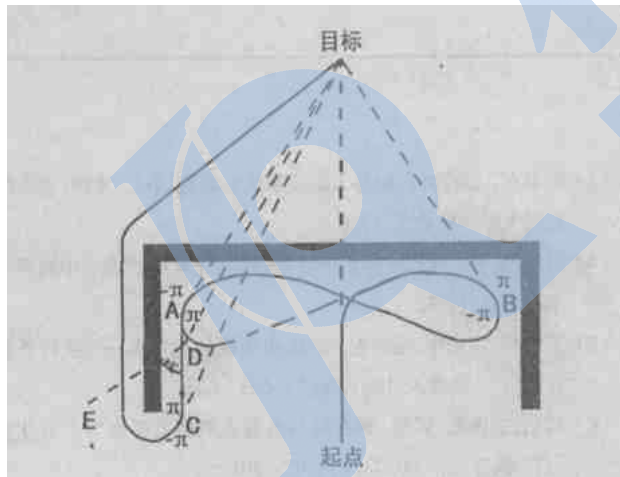


图 6 克服陷阱策略图

Fig. 6 Strategy of escaping trap

仔细分析图 6 将会发现 A、B 两个关键点, 在这两个点处目标方位角将发生 $-\pi$ 到 π 或 π 到 $-\pi$ 的质变, 这将改变机器人的转向趋势(目标方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时, 机器人有向左转向的趋势; 目标方位角在 $-180^\circ \sim 0^\circ$ 时, 机器人有向右转向的趋势), 机器人尽量向目标前进的特性将导致机器人陷入陷阱. 如果我们在检测到关键点时, 合理地改变目标点就可以引导机器人走出陷阱. 具体规划策略如下: 假定前文

模糊控制规则 16~ 20 号选择 TRB(在各方向障碍物较近时选择向右转向), 因此机器人在可能碰到陷阱时首先考虑向右转向, 尝试从右侧绕过障碍物. 如图 6 所示, 这时将出现关键点 B, 但由于不知道左侧障碍物情况, 故机器人不响应关键点 B. 当机器人检测到关键点 A 时可以判定进入陷阱, 采取虚拟目标点方法将目标虚拟到当前前进方向右侧 60° (60° 对应于 RB 的隶属度为 1). 故此时机器人将尽量向右转向, 但由于右侧存在障碍物, 所以机器人只能沿障碍物壁向前前进. 当检测到关键点 C 后(C 处方位角发生 π 到 $-\pi$ 的变化) 取消虚拟目标策略, 机器人可以顺利达到终点. 该法具体实现时, 无须改变模糊推理规则, 当检测到关键点后(若 16~ 20 号规则选择 TRB 时响应 A 点, 若选择 TLB 则响应 B 点), 只要用虚拟目标方位角信息代替实际方位角信息作为模糊控制器的输入就可引导机器人走出陷阱, 等走出陷阱后取消虚拟信息而恢复输入实际信息. 最终规划过程如图 6 中实线所示.

4 仿真(Simulation)

基于上述思想, 我们利用微机进行了仿真实验, 仿真参数为: 机器人外轮廓 25cm; 机器人最大步长 10cm; 仿真空间为 $30m \times 20m$ 的矩形. 所得结果如图 7、图 8 所示.

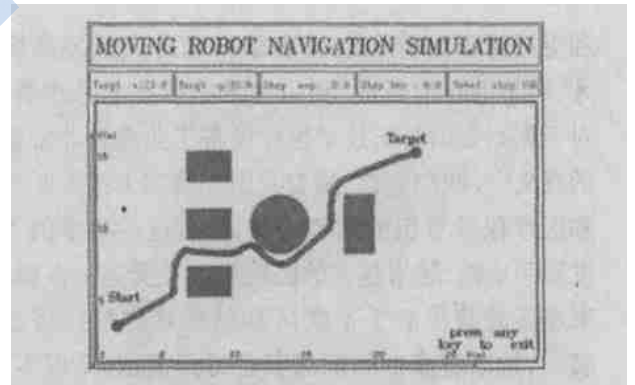


图 7 无陷阱时规划结果

Fig. 7 Planning result without trap

图 7 中模拟机器人在没有陷阱的情况下, 顺利地绕过了矩形与圆形障碍物从起点到达了终点, 而且在机器人转弯处步长有明显的减小过程, 给机器人以足够多的反应步数调整方向实现了用转向角来控制步长的效果. 图 8 中机器人先后两次进入了 U 型障碍物, 机器人成功地利用虚拟目标点的方法摆脱陷阱最终顺利到达目标点.

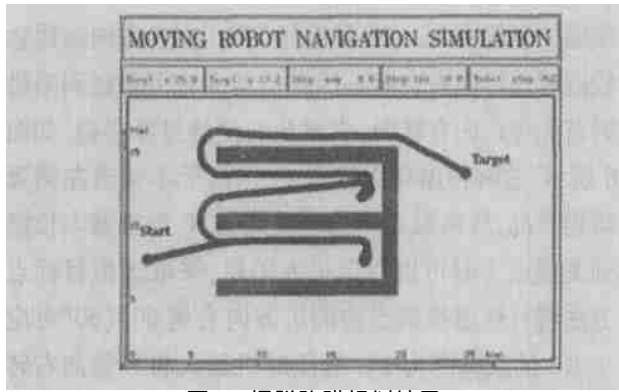


图8 摆脱陷阱规划结果

Fig. 8 Planning result of trap escaping

5 结论(Conclusion)

本文结合了“虚拟目标”的方法与模糊控制理论,给出了一种移动机器人局部路径规划的方法.通过仿真实验证明了该方法保持了模糊控制所具有的计算量小的特点,能够适应复杂的环境,可以克服局部最小,同时具有较好的实时性.本文采用了步长的转向角控制方法,在不增加模糊控制器复杂性的基础上提高了机器人拐弯时的可靠性,有利于机器人实现无碰避障.

(上接第 547 页)

和应用对于培养和造就多学科综合交叉型高级人才,对于更好地开发、利用和维护高技术医疗器械,对于振兴我国高新技术医疗设备工业都有非常重要的意义^[5].我们坚信,随着我国经济实力的不断增强和医疗保健意识的逐步提高,随着这一技术的不断发展和成熟,越来越多的医院将会接受这一系统,越来越多的脑深部手术禁区 and 脑疑难病禁区将被打破^[6],越来越多的脑病患者会得到微创、低成本、有效而可靠的治疗.

参考文献 (References)

- [1] Rembold, Ulrich, Bughart, Catherina R. Surgical robotics: an introduction[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. 2001, 30(1):1-28.
- [2] Lavelle S, et al. Computer integrated Surgery[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1995.

参考文献 (References)

- [1] Borenstein J, Koren Y. Real time obstacle avoidance for fast mobile robots [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, 19(5): 1179-1187.
- [2] 张纯刚, 席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的机器人路径规划 [J]. 中国科学, 2001, 31(1): 51-58.
- [3] 陈宗海. 月球探测器路径规划的基于案例的学习算法研究 [J]. 航空计算技术, 2002, 2(6): 1-4.
- [4] Xu W L, Tso S K. Real time self reaction of a mobile robot in unstructured environments using fuzzy reasoning [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1996, 9(5): 475-485.
- [5] Xu W L, TSO S K. Sensor based fuzzy reactive navigation of a mobile robot through local target switching [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1999, 29(3): 451-459.

作者简介:

- 付宜利 (1966), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人技术, 数字化设计制造.
- 顾晓宇 (1979), 男, 硕士研究生. 研究领域: 机器人技术.
- 王树国 (1958), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人机构学, 机器人动力学控制与仿真.

- [3] 陈梦东. 医疗外科机器人集成系统的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学学位论文, 1998.
- [4] 田增民, 等. 现代立体定向神经外科学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997.
- [5] 王田苗, 宗光华, 张启先. 新应用领域的机器人——医疗外科机器人[J]. 机器人, 1996, 18(7): 603-606.
- [6] 刘达, 王田苗, 胡磊. 医疗外科机器人的研究开发与产业化前景 [J]. 机器人, 2000, 22(7): 897-901.

作者简介:

- 唐 黎 (1973), 男, 硕士生. 研究领域: 医疗机器人, 智能控制.
- 王田苗 (1960), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 医疗机器人, 嵌入式技术, 微小型仿生机器人, 机器人遥控操作技术.
- 超 (1952), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人工程应用技术.