

AS-R 移动机器人的动态避障与路径规划研究

陈晋音¹ 杨东勇¹ 邹青华²

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)¹ (浙江工业大学计算机软件学院 杭州 310023)²

摘要 针对移动机器人的动态避障和路径规划问题,以 AS-R 移动机器人平台为平台,设计了一种基于行为分析的动态避障策略。根据避障问题将移动机器人整个运行过程中的行为划分成趋向目标行为、避障行为、沿墙走行为及紧急避障 4 种行为,有效实现了机器人的动态避障,并解决了两种避障难题:左右摆动问题和凹型障碍物问题。利用多传感器结合检测方法,通过红外传感器减少盲区和镜面反射带来的误差,通过间隔采样或分组采样技术避免多路串扰问题;对均值滤波与中值滤波进行实验对比后,提出一种递推型中值滤波方法,从而提高了数据在空间和时间上的连续性,有效地减少了超声波随机串扰信号及其它干扰信号,进而提高了探测模块的准确度。最后设计了几种复杂环境下机器人的动态避障和路径规划,并验证了所提方法的有效性。

关键词 AS-R 移动机器人,行为分析,模糊逻辑,动态避障,路径规划

中图分类号 TP242.6 **文献标识码** A

Research on Dynamic Obstacle Avoidance and Path Planning for AS-R Mobile Robot

CHEN Jin-yin¹ YANG Dong-yong¹ ZOU Qing-hua²

(Information Engineering Department, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(Computer Department, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)²

Abstract Aiming at the problem of obstacle avoidance for mobile robot with the platform of AS-R mobile robot, a novel approach based on behavior for dynamic obstacle avoidance was put forward, which divides the robot behavior during the entire run into four behaviors, including tendency to target behaviors, obstacle avoidance behavior, going along the wall and emergency obstacle avoidance behavior of four acts, including obstacle avoidance behavior. A multi-sensor-based autonomous mobile robot obstacle avoidance mechanism was designed. A recursive median filter-based method was proposed to avoid crosstalk by grouping sampling or interval sampling technologies. The data was improved in both space and time continuity. The ultrasonic signal crosstalk and other interference random signals were effectively reduced. Experiments based on both simulation platform and AS-R robot verified the effectiveness of the proposed approach.

Keywords AS-R mobile robots, Behavior analysis, Fuzzy logic, Dynamic obstacle avoidance, Path planning

1 引言

机器人路径规划是移动机器人应用和研究的一个关键技术和热点^[1],如何实现机器人的动态避障与路径规划是重点。机器人的路径规划可以分为全局路径规划与局部路径规划。其中局部路径规划着重考虑机器人实时探索局部环境信息,实现在线实时规划。与全局规划方法相比,局部规划更具有灵活性和实用性,其缺点是仅依靠局部环境信息,可能陷入局部极值点或者发生振荡^[2]。目前,应用广泛的是动态未知环境下的避障和路径规划,但缺乏高效的、实际应用性强的方法。针对未知环境下的路径规划,传统方法包括可视图法^[3]和 A* 算法^[4]。随着问题规模增大,它们的时间和空间复杂度明显增大,因此无法直接用于实际。近几年,利用改进遗传算法、人工势场法^[5]、模糊逻辑算法^[6]、强化学习^[7]、粒子群算法^[8]等实现局部路径规划,仿真结果证明了方法的可行性,但

在实际机器人上均未能获得仿真的效果,限制了这些算法的进一步实用、推广。

针对未知、动态、非结构化环境的特性,从行为的角度设计一种移动机器人的自主避障方案;设计了一种基于行为分析的动态避障策略;根据避障问题将移动机器人整个运行过程中的行为划分成趋向目标行为、避障行为、沿墙走行为及紧急避障 4 种行为,实现机器人的动态避障。并利用多传感器结合检测方法,通过红外传感器减少盲区和镜面反射带来的误差;通过间隔采样或者分组采样技术避免多路串扰问题。最终实现了 AS-R 移动机器人在真实环境的动态避障和路径规划,证明了提出方法的实时性与高效性。

2 AS-R 移动机器人及传感器数据预处理

AS-R 机器人是上海未来伙伴机器人有限公司研制的用于实验室教学和科研的机器人平台(见图 1)。

到稿日期:2011-04-06 返修日期:2011-06-04 本文受基于人工免疫和移动代理的无线传感器网络轻量级入侵检测研究(Y1100378)资助。
陈晋音(1982-),女,博士,讲师,主要研究方向为机器人路径规划、智能计算与应用,E-mail:chenjinyin@163.com。

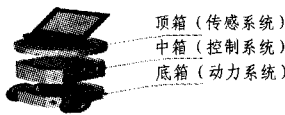


图1 AS-R 机器人结构体系

2.1 AS-R 移动机器人

采用模块化设计。功能模块分为传感、控制和动力3个部分。集成 Windows 操作系统和 VC 开发环境。其中测距传感系统主要由声纳传感器和红外传感器组成。AS-R 移动机器人装备有 5 个声纳传感器和 4 个红外传感器,它们以 15° 的间隔分布在机器人前半部分(见图 2)。

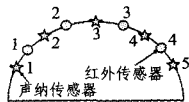


图2 AS-R 机器人传感器分布示意图

声纳传感器具有处理速度快、受环境影响小和测距精度高的优点,其测距范围为 43~700cm;红外传感器具有方向性强和不发生串扰等优点,其测距范围为 10~80cm。对于超出测量范围的距离,传感器返回本设备的测量极值。因此,声纳和红外传感器的测距范围具有互补性,两者综合利用可以改善局部路径规划和避障性能。

2.2 传感器数据预处理

传感器自身精度和外界环境干扰都将造成无法准确获得障碍物的距离信息。在测试 AS-R 机器人的声纳时也印证了这点。对一固定的、实际距离为 2.75m 的障碍物进行一段时间的测距,结果如图 3 所示。图中的横轴表示采样序列,纵坐标表示传感器返回的测距值。

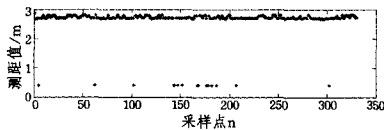


图3 声纳传感器采样序列

这一序列有效值范围在(2.69, 2.85)之间,而且夹杂着干扰信号,其标准差为 0.49。如果不经过处理,直接将这组数据应用于环境建模或者局部避障,那么会产生错误的决策。因此,必须对直接获得的传感器数据进行处理。通过滚动中值滤波方法对传感器数据进行处理来提高测距精度,并削弱干扰影响。经过中值滤波后的序列如图 4 所示。

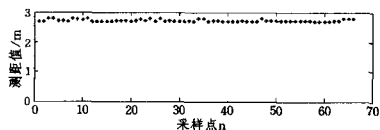


图4 中值滤波后的采样序列

3 基于行为的 AS-R 移动机器人动态避障

基于行为法是移动机器人在非结构化环境中的避障新思路,使得移动机器人的控制过程由一系列的行为组成。而行为是用来完成任务的基本控制单元,任意行为始终围绕目标任务进行特定的感知并且给出该行为的控制命令,所以行为

可以描述成传感器输入到执行器输出的命令函数。移动机器人完成任务的过程则是多个行为之间共同作用的结果。

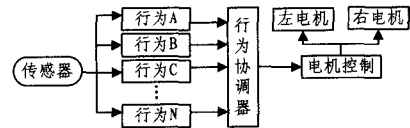


图5 行为控制示意图

从图 5 的结构中可以发现,当移动机器人存在多个确定行为时,如何协调各行为之间的关系至关重要。Tyrrell 与 Saffiotti 将行为协调机制分成两种:仲裁机制(Arbitration)与命令融合(Command Fusion)。前者主要是在相同时间段上只允许机器人最终执行其中的一种行为动作,主要有概率法、Maes 法及基于优先级法;后者则是将各个行为按照某种方法合并成一个命令,传送给机器人的控制机构,主要有运动意图法、模糊融合法、混合方法、多目标优化及投票法。

3.1 基于行为法的避障流程

AS-R 移动机器人在未知环境运行中借鉴慎思/反应式思想,通过多个行为协调完成避障。避障步骤如下:

步骤 1 给定移动机器人的起点与终点位置,并初始化系统;

步骤 2 利用红外传感器和超声波传感器采集四周障碍物距离信息,并进行滤波处理,提高精确度;

步骤 3 通过步骤 2 得到距离信息,触发相应的行为,通过行为协调机制得到理论输出结果,传送给机器人控制机构后执行相应的操作;

步骤 4 移动机器人实时检测是否到达目标点,是则停止,否则跳到步骤 2,不断重复这一过程直至目标终点位置。

避障流程如图 6 所示,证明了基于行为设计的移动机器人避障系统,通过行为之间的协调可以达到良好的运行效果。

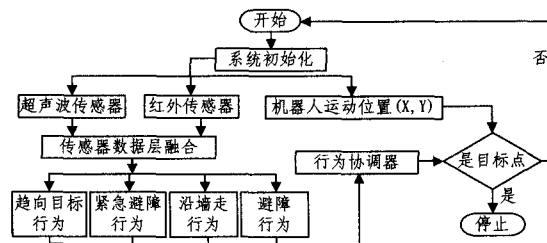


图6 移动机器人避障流程图

3.2 AS-R 移动机器人状态转换图

根据图 6 可知,系统初始时只含有世界坐标下给定的起点坐标和终点坐标,移动机器人朝着终点位置前进并且要始终维护这条运动轨迹。若沿途不存在障碍物,则机器人将运行至终点。若检测到障碍物,则先停止,保存当前坐标信息,然后通过避障模块转过一定角度至安全方位,接着直线前进一个固定步长。循环此步骤,直至终点。

该系统分成以下几个基本状态:旋转状态 stRotate、直线运行状态 stGoStraight、避障状态 stAvoid、停止状态 stStop。初始状态规定为 stNull,因此得到该系统状态转换图如图 7 所示。其中 cmdGoStraight、cmdRotate、cmdStop 分别代表执行直行、旋转、停止命令, isDistination 判断标识符代表是否到

达目标点。

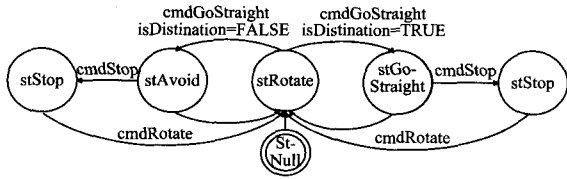


图7 移动机器人状态转换图

3.3 避障过程中的行为设计

按照移动机器人避障任务要求,设计了4种基本行为,分别是避障行为、紧急避障行为、沿墙走行为及趋向目标行为,并采用模糊控制对避障和沿墙走行为进行控制。

3.3.1 避障行为

AS-R 移动机器人避障过程中通过超声波和红外传感器获取周围障碍物距离信息,经过数据处理得到精确的障碍物距离数值。将检测结果作为模糊控制器的输入量,触发基本行为,通过行为协调器得到输出量。基于行为的设计过程如下。

在 AS-R 机器人传感器系统中,由于声纳的测距范围(43~700cm)无法正确反映近距离障碍物的距离信息,因此根据红外传感器与声纳在测距范围上的互补性,针对近距离突然出现的障碍物本文提出基于红外传感器的模糊逻辑避障策略。模糊逻辑器的两个输入即1号与4号红外传感器(如图2)的测距值之差 $X_1 = |d_{pd1} - d_{pd4}|$,以及2号与3号红外传感器的测距值中的较小值 $X_2 = \min(d_{pd2}, d_{pd3})$ 。 X_1 表示机器人两侧障碍物的距离信息, X_2 表示机器人前方的障碍物信息。模糊逻辑的输出为机器人的转角 Y_u 。

X_1 的论域分别为 $[-60\text{cm}, 60\text{cm}]$,模糊语言子集为 $[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]$ 。其中 N: Negative, P: Positive, B: Big, M: Middle, S: Small。

X_2 的论域为 $[10\text{cm}, 80\text{cm}]$,模糊语言子集为 $[N, M, F]$ 。其中 N: Near, M: Middle, F: Far。

输出 Y_u 的论域为 $[-90^\circ, 90^\circ]$,模糊语言子集为 $[TRB, TRM, TRS, TZ, TLS, TLM, TLB]$ 。其中 T: Turn, R: Right, L: Left, 另外 B, M, S 的含义同 X_1 。

各输入输出变量的语言变量设置为三角形隶属函数,如图8所示。

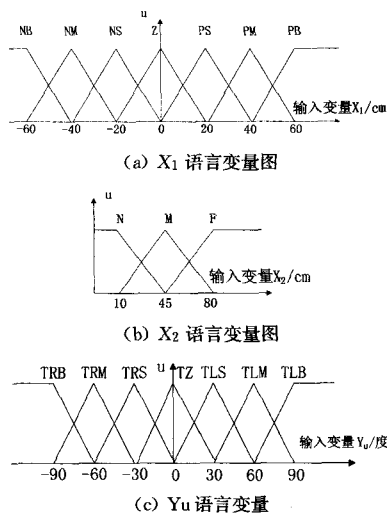


图8 输入输出变量的隶属函数

经过经验和实验总结,建立输出的模糊逻辑规则表,如表1所列。此处为输出 Y_u 设置较大的转角,以实现近距离障碍

物情况下紧急避障。去模糊化采用最大隶属度的最大值法(LOM)^[11]。

表1 模糊逻辑规则表

X2	X1						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
F	TZ	TRS	TRM	TRM	TLM	TLS	TZ
M	TRS	TRM	TRM	TRM	TLM	TLM	TLS
N	TRM	TRM	TRL	TRL	TLB	TLM	TLM

3.3.2 紧急避障行为

当移动机器人在运动过程中距离前方动态障碍物非常近时,将触发紧急避障行为,使得移动机器人紧急刹车,停止运动,直到这些障碍物离开后开始继续运行。一般而言,移动机器人在接近障碍物过程中已经发生了上述的避障行为,只有当突然出现意外情况,即四周被障碍物包围时,紧急避障行为才被触发。

移动机器人在前进过程中探测到其四周一定范围内存在障碍物,但是这些障碍物的距离小于移动机器人安全避障距离,此时发生避障行为已经不能满足避开障碍物的要求,所以有必要设置一个紧急避障行为。

3.3.3 沿墙走行为

当移动机器人在行驶过程中发现自身的左边或者右边都有墙壁存在,而且在趋向目标行为或者避障行为等共同驱使下使得自己与墙之间的距离比较近时,将发生沿墙走行为。根据移动机器人行驶过程中实际探测到障碍物位于左右侧的问题,可以将其分成沿着左侧墙行走或者右侧墙行走。这种沿墙走行为特别适合移动机器人陷入障碍物体积特别大的情况,可以使得机器人尽快地摆脱障碍物陷阱。左、右或两边墙壁分布情况示意图如图9所示。

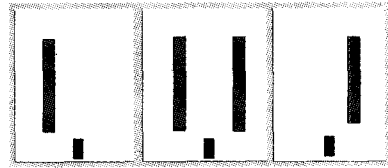


图9 左、右或两边墙壁分布情况示意图

当移动机器人自身左右侧的传感器检测到有障碍物存在时,根据距离值来设计控制器,最终得到转向角的大小。那么可以建立相应的沿墙走行为控制规则,DL(DR)代表距离左边(右边)墙的距离,经过模糊化后变为 $\{F, M, N\}$,分别表示远、中、近; W 代表转向角的大小,经过模糊化后变为 $\{WF, WM, WN\}$,分别表示 $-15, 0, 15$ 。图10给出相应的左边(右边)墙的隶属函数及输出转角的隶属函数。

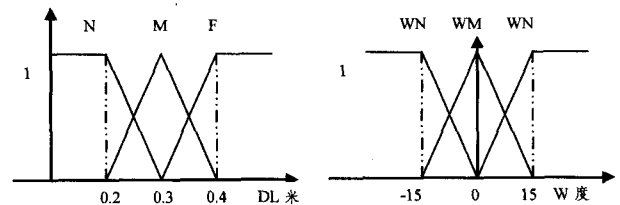


图10 输入、输出变量的模糊化隶属度函数

表2 沿墙走行为规则库

序号	DL(DR)	W
1	F	WF
2	M	WM
3	N	WN

如果是右边遇到障碍物墙,那么按照表 2 所列的规则同样可以推导出相应的结论。

3.3.4 趋向目标行为

若传感器探测到移动机器人假定的安全范围内不存在障碍物,那么机器人执行趋向目标行为。该行为通过具体计算当前机器人位置坐标点和目标坐标点之间的距离与方向来激发移动机器人照着目标方向行驶。图 11 给出世界坐标系 $\{X, Y, O\}$ 下发生趋向目标行为的示意图。

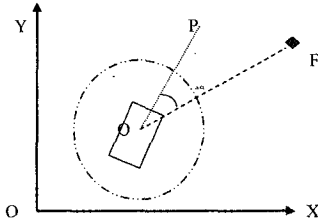


图 11 趋向目标行为示意图

其中, $Q(x_1, y_1)$ 点表示当前机器人所处的位置, QP 代表当前机器人的行驶方向, 点 $F(x_2, y_2)$ 代表目标点位置, 那么 $\Delta\theta$ 代表当前行驶方向与目标方向的夹角, 即为两直线的夹角。式(1)代表了几组数据的关系:

$$\begin{cases} \tan\theta_1 = y_1/x_1 \\ \tan\theta_2 = y_2/x_2 \\ \Delta\theta = \arctan((y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)) - \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

哈尔滨工业大学的赵海文博士^[2]在他的论文中提到, 如果将移动机器人的趋向目标行为同时融入到模糊控制中, 会使得它在某些条件下得到的输出效果很不好, 则会出现左右摆动现象, 难以解决。本文设计的趋向目标行为, 根据 $\Delta\theta$ 的取值大小区间将下一步的转向角划分成不同的情况, 则记下一步的转向角为 WG , 那么可以进行如下描述:

$$WG = \begin{cases} \Delta\theta, & |\Delta\theta| < A \\ A, & |\Delta\theta| \geq A \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 为阈值, 实验过程中将它设置为 $\pi/3$ 。

3.4 避障行为可行路径评价

AS-R 移动机器人在运动过程中运动轨迹构成的曲线的平滑度是一个重要参数, 因为可以从平滑度得到机器人在运动过程中所消耗的能量。机器人在运动过程中, 如果运动的距离很长或者碰到急转弯, 会消耗大量能量, 并随之产生绝对距离误差。因为移动机器人转弯时, 转弯的半径越小, 消耗的能量就越小, 随之产生的误差就越小。将轨迹长度和能量消耗函数 ECF 相结合, 作为轨迹平滑度量:

$$ECF = \sum_{i=1}^L c^2(x_i, y_i) \quad (3)$$

该度量将机器人轨迹和运动中消耗的能量结合, 因此长路程和急转弯将消耗更多能量。如果机器人在运动过程中, 轨迹非常平滑, 则能量消耗和时间消耗都是较少的。

弧长的变化率就是曲率, 因此以运动轨迹上的每一个点对应的曲率来表示机器人运动轨迹构成曲线的平滑度。本文采用正交回归法, 来计算运动轨迹曲线的曲率。在欧几里德平面中, 梯度对弧长的变化率被定义为曲率。假设曲线方程为 $y=f(x)$, 则曲率为

$$\frac{d^2 y/d^2 x}{(1+(dy/dx)^2)^{3/2}}$$

曲线是由离散点组成的, 这样就必须求出所有点的曲率。因此, 采用基于参考点前后方向的方法, 来估算所有点的曲率。在得到一个点(第 i 点)的曲率后, 就能得到该点的能量损耗(E):

$$E_i = c^2(x_i, y_i) \quad (4)$$

式中, $c(x_i, y_i)$ 是机器人任意轨迹点曲率。那么整条运动轨迹消耗的总能量(ECF)为:

$$ECF = \sum_{i=1}^L E_i \quad (5)$$

式中, L 为轨迹点总数。这样的路径点能量表示法, 同时考虑到将机器人行走路径长度和转弯能量。因为长路径和大转弯会消耗很大的能量, 所以 ECF 值就很高。为了将能量消耗和路径平滑度关系表现得更直观, 给出图 12。从图中可以看出, 曲线 D 消耗能量最好, 曲线 A 消耗能量最大, 能量消耗随曲率增大而增大。

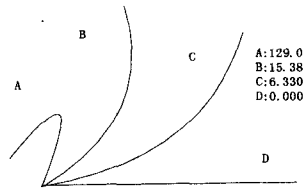


图 12 几种运动曲线的能量消耗

通过上面的方法, 可以求出机器人运动(避障、路径规划)的最优路径, 可以对不同实验得到的路径进行性能比较。

4 实验结果

实验环境分别是: 多静态障碍物环境下的实验、动静态障碍物环境和凹型障碍物死循环情况及解决的实验。

4.1 多个静态障碍物实验

实验一 场景中存在多个静态障碍物, 结果如图 13 所示, 其中起点位置为 $(0, 0)$, 终点位置为 $(1, 3)$ 。

图 13(a) 为移动机器人初始行驶状态, 到图 13(b) 这一过程中遇到左前方障碍物后向右边偏转, 越过障碍物后又趋向目标行驶, 到图 13(c) 这一过程中由于前方遇到障碍物后向右转, 位于图 13(d) 时遇到障碍物向左转, 图 13(e) - 图 13(f) 代表避开障碍物运行至终点位置。

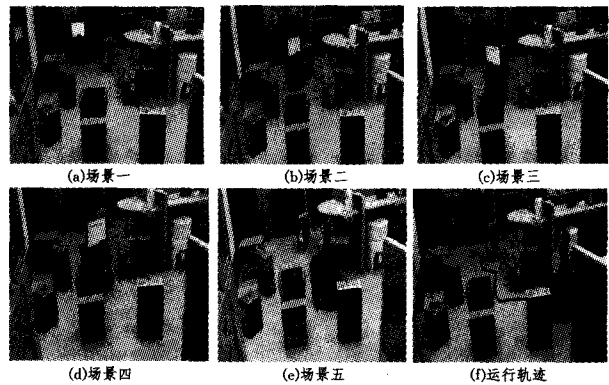


图 13 多静态障碍物下运行结果

移动机器人运行轨迹实时保存坐标点信息, 将其描绘成图 14。

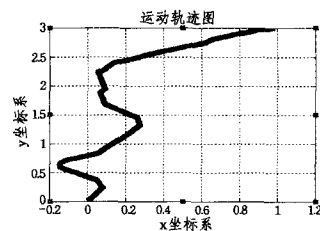


图 14 运行轨迹图

