

# 采用模糊逻辑的移动机器人轨迹跟踪

骆德渊, 刘 荣, 李纪文

(电子科技大学机械电子学院 成都 610054)

**【摘要】**针对差动轮驱动的移动机器人动力学的高度非线性和运动环境的不确定性, 提出了基于模糊逻辑的移动机器人路径跟踪控制方法。该方法通过合理选择模糊控制器的参数和优化规则库, 使其输出合适的线速度和角速度, 从而控制移动机器人准确地跟踪预规划的路径。提出了两轮差动式移动机器人的动力学模型, 使得该模糊控制器对不同几何参数的差动式机器人具有普遍的适应性。在实际场地试验和亚太机器人大赛中验证该方法的有效性。

**关键词** 控制; 模糊逻辑; 移动机器人; 轨迹跟踪

**中图分类号** TP242.6

**文献标识码** A

## Path Tracking of Mobile Robots Using Fuzzy Logic

LUO De-yuan, LIU Rong, and LI Ji-wen

(School of Mechatronics Engineering, University Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new path tracking control method is proposed for uncertain mobile environment and high nonlinear dynamic of differential driven robot. The method applies fuzzy control theory to obtain the appropriate velocity and angular velocity by selecting optimal parameter of fuzzy logic controller. In order to obtain the optimal planning path of mobile robot, the dynamic model of differential driven robot is presented to expand the suitable range of geometric parameter derived from fuzzy controller. The effectiveness of the method developed is verified in the design of a robot vehicle with experiment.

**Key words** control; fuzzy logic; mobile robots; path tracking

自主移动机器人的控制通常包括感知、轨迹规划、轨迹跟踪和底层控制4个主要子任务。感知系统提供全局定位功能以及关于机器人运动状态的其他重要信息, 如速度、加速度等。轨迹规划器根据感知系统提供的信息, 从当前位置到目标位置之间实时地规划出一条符合规则、避开障碍、最优化的路径<sup>[1]</sup>。轨迹跟踪的主要任务是考虑移动机器人实际位置和运动状态的情况下, 准确地跟踪一条预定义(实时产生或离线产生)的路径。由于移动机器人动力学的高度非线性和工作环境的不确定性, 使得轨迹跟踪成为移动机器人控制环节中最复杂、最困难的任务之一。许多学者对此也作了研究, 文献[2]和文献[3]提出线性比例控制, 文献[4]提出PI控制, 文献[5]提出预测控制方法, 文献[6]提出遗传算法控制。针对移动机器人动力学模型的高度复杂性和非线性, 本文采用模糊逻辑来实现轨迹跟踪控制。在不确定的工作环境中, 轮子和地面之间的接触很难准确的建模<sup>[7]</sup>, 而模糊控制器善于解决该类具有非完整性和不确定性的非线性子系统之间的交互作用。

另外, 模糊控制器也特别适合在缺乏精确完整的模型情况下, 将人的经验直接运用于移动机器人的驱动控制中。

### 1 移动机器人模型

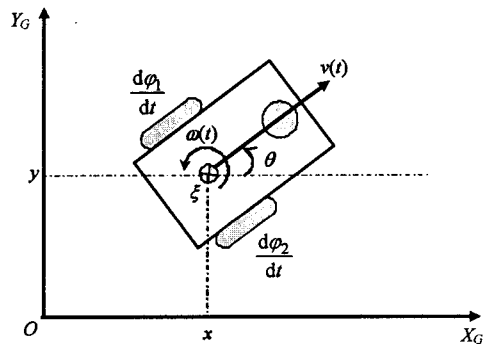


图1 机器人在全局坐标系

考虑如图1所示的典型两轮差动式机器人简化模型。它具有两个同轴的驱动轮, 每个轮子由单独的电机驱动, 前轮是一个起支撑平衡作用的万向轮。在全局坐标系中, 机器人的质心标记为 $\xi$ , 两差动

轮的轮距为  $2l$ ，每个驱动轮绕其水平轴的转角分别记为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ，驱动轮的半径为  $r$ ，任一时刻机器人在全局坐标系中的姿态位置由  $x, y, \theta$  确定，即：

$$v(t) = \frac{\frac{d\varphi_1}{dt}r + \frac{d\varphi_2}{dt}r}{2}$$

(1)

$$\omega(t) = \frac{\frac{d\varphi_2}{dt}r - \frac{d\varphi_1}{dt}r}{2l}$$

(2)

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}$$

(3)

机器人轨迹跟踪系统的控制结构如图2所示。路径规划器产生的一系列的目标点和感知系统提供的机器人的当前位姿状态一起作为模糊控制器的输入，经过模糊推理后，输出线速度  $v(t)$  和角速度  $\omega(t)$ ，再由式(1)和式(2)计算转换，得到两个差动驱动轮的角速度  $\frac{d\varphi_1}{dt}$  和  $\frac{d\varphi_2}{dt}$ ，它们将直接用于底层电机控制的输入级。控制器硬件实现采用ARM7处理器，通过调整PWM脉冲输出来控制驱动电机的转速，左右驱动轴上均装有光电编码器用来检测角速度  $\frac{d\varphi_1}{dt}$  和  $\frac{d\varphi_2}{dt}$ 。

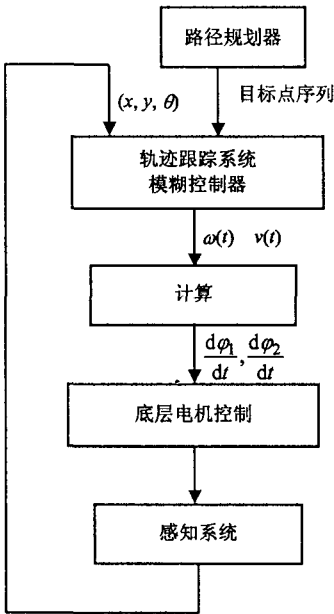


图2 控制系统结构

2 模糊控制轨迹跟踪系统

考虑在全局坐标系中路径曲线上距当前位置最

近的一个目标点  $P(x_p, y_p)$ ，如图3所示，机器人的当前位姿由  $x, y, \theta$  决定， $\theta$  是机器人与水平坐标轴之间的夹角。

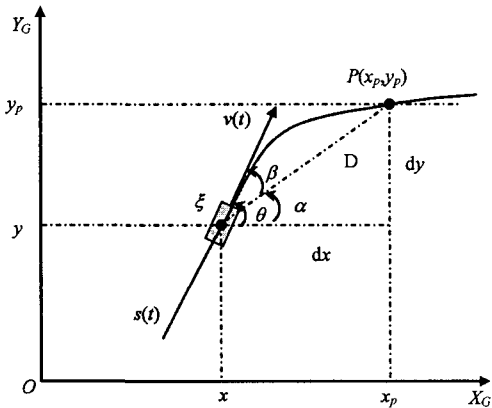


图3 模糊控制器的各个变量

在设计一个模糊控制系统前，系统的输入输出参数必须首先被识别。本文中，模糊控制器共有4个输入输出参数， $D$  和  $\beta$  是输入参数， $D$  是机器人当前位置和目标点之间的距离， $\beta$  是当前角度  $\theta$  和期望角度  $\alpha$  之差，如图3所示。控制器的输出参数是线速度  $v(t)$  和角速度  $\omega(t)$ 。各参数变量之间的约束关系为：

$$\begin{cases} dx = x_p - x \\ dy = y_p - y \\ \alpha = \tan^{-1}(dy/dx) \\ \beta = \theta - \alpha \\ D = \sqrt{dx^2 + dy^2} \end{cases}$$

式中  $\beta$  的取值范围为  $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 。若  $\beta$  取负值，代表机器人应该向左逆时针旋转；反之则应向右顺时针旋转。

2.1 模糊化

表1 模糊输入变量	
距离 $D$	角度 $\beta$
ZE: 零	NL: 负大
VN: 非常近	NM: 负中等
NE: 近	NS: 负小
NN: 一般近	ZE: 零
ME: 中等	PS: 正小
NM: 一般中等	PM: 正中等
FA: 远	PL: 正大
NF: 一般远	
VF: 非常远	
EF: 格外远	

设计模糊控制系统的下一步是将模糊集表达为语言变量，这些语言变量及其取值范围用于表达专家的控制决策。轨迹跟踪系统的输入语言变量如表1

所示。这些语言变量的值由三角形隶属函数限定, 其取值范围经多次实地试验后确定。

图4所示为参数  $D$  的隶属函数, 最右侧开放的梯形表示当输入值达到或超过限定的范围时, 隶属函数的隶属度将取最大值1。

另外在图4中, 模糊集ZE和VN明显窄于其他的模糊集, 这些窄的模糊集给予机器人更高的控制灵敏度。

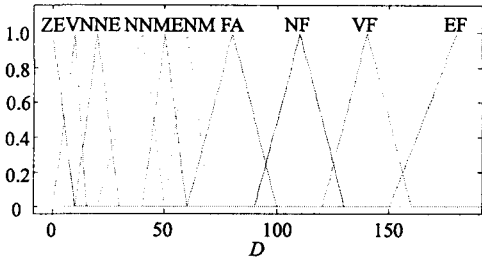


图4 参数 $D$ 的隶属函数

2.2 模糊规则库

模糊规则用于建立从输入到输出的一系列映射关系, 表达和存储这些关系的最好方式是使用FAM(fuzzy associative memory)矩阵, 其大小取决于模糊系统语言变量的个数。本文中有两个输入变量, 每个各有7个和10个模糊集, 形成一个二维(10×7)FAM矩阵, 总共有70条规则。这些规则可以表述成IF-THEN条件式, 如线速度  $v(t)$  的FAM规则(NL, VN: VS), 对应到MISO(multi-input single-output)的语言条件为:

IF  $\beta$ =NL (负大) and  $D$ =VN (非常近)  
THEN  $v(t)$ =VS (非常小)

类似地, 角速度  $\omega(t)$  的FAM规则(NL, VN: PL)对应的IF-THEN条件为:

IF  $\beta$ =NL (负大) and  $D$ =VN (非常近)  
THEN  $\omega(t)$ =PL (正大)

以上规则表明, 如果机器人距目标点非常近而且角度相差非常大时, 模糊控制器应该产生合适的速度和角速度, 以使移动机器人大幅度地右转, 并缓慢接近目标点。

2.3 模糊推理和解模糊

采用Mamdani推理方法, 即“AND”采用取小运算, “ALSO”采用求并运算来确定模糊输出量的隶属度。如考虑输入参数  $D$  为50、 $\beta$  为30时, 根据定义的隶属度函数, 这个输入值将触发线速度  $v(t)$  的FAM规则(PM, ME: ME), 其中, 角度30属于PM的隶属度为0.7, 距离50属于ME的隶属度为1, 则输出  $v(t)$  属于ME的隶属度为:

$$\min(\mu_{\beta}(30), \mu_D(50)) = \min(0.7, 1) = 0.7$$

则输出速度为:

$$v(t) = 0.7ME$$

类似地, 该输入触发  $\omega(t)$  的FAM规则(PM, ME: NS), 输出角速度为:

$$\omega(t) = \min(\mu_{\beta}(30), \mu_D(50))NS = 0.7NS$$

如果还有其他的规则被触发, 采用COA(centre of area)计算输出为:

$$v(t) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i(t)}{\sum_{i=1}^n \min(\mu_{i\beta}, \mu_{iD})}$$
$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i(t)}{\sum_{i=1}^n \min(\mu_{i\beta}, \mu_{iD})}$$

式中  $v_i(t), \omega_i(t)$  为FAM矩阵的第  $i$  条规则的输出值;  $n$  为FAM矩阵的大小。

3 实验

本文使用的实验场地是ABU2006(asia-pacific robot contest 2006)标准竞赛场地。移动机器人的尺寸为15 cm×15 cm×15 cm, 场地的大小采用1 300 cm×1 300 cm, 如图5所示。为了执行进一步的比赛任务, 移动机器人必须从启动区尽快地到达工作区指定的位置。

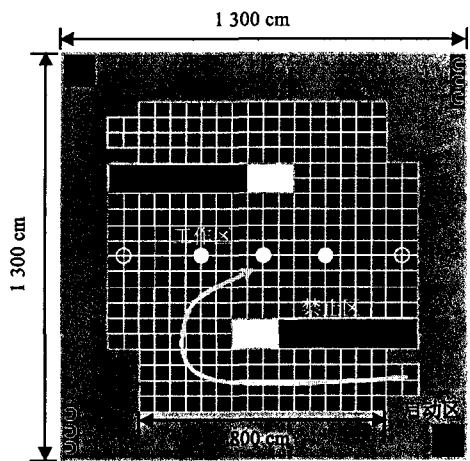


图5 ABU2006场地示意图

将机器人置于坐标零点60 cm处, 角度偏差为0, 然后启动它追踪一条预定义的路径, 该路径由直线段和圆弧连接构成, 如图6所示。机器人的实际轨迹以虚线标识, 在最大速度1.2 m/s的实验中, 机器人对路径的拟合度相当好。

图7显示了跟踪另外一条预定义高难度路径的效果, 该路径主要由陡峭多变的曲线构成, 起始位置不变。由图可以看出, 由于机器人的运动惯性, 在路径的曲率变化处, 实际轨迹相对于定义路径有

一些明显的偏移,最大时达到21 cm。不过基于ABU2006比赛的任务要求标准,该偏差仍可接受。

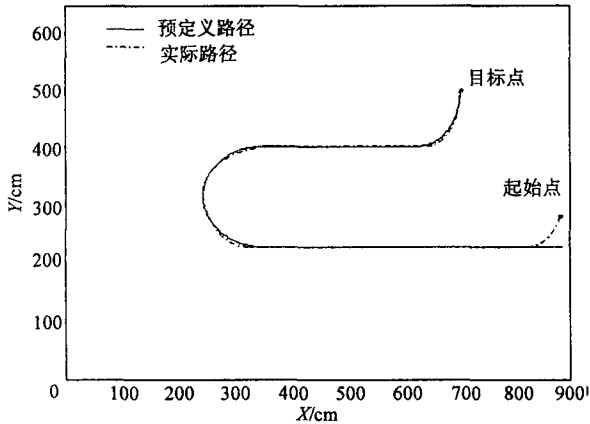


图6 跟踪效果1

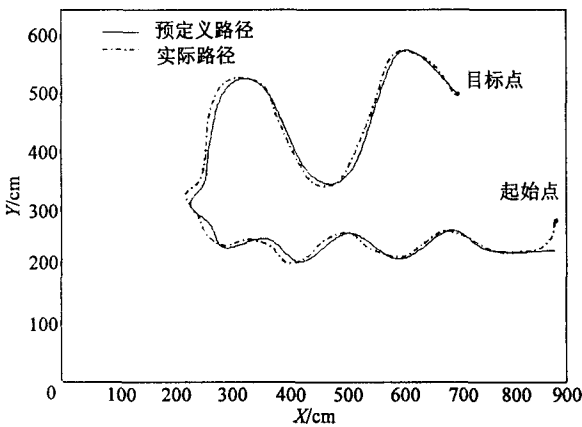


图7 跟踪效果2

## 4 结论

本文采用模糊控制原理对移动机器人的路径跟踪进行控制,并在亚太机器人大赛中得到了多次的测试和应用。实践证明该控制器具有良好的跟踪效果(尤其对于平滑路径),在不确定的环境中系统仍具有较强的稳定性和鲁棒性。对于不同几何参数的两轮差动式移动机器人,该控制系统只需要简单地调整两个参数( $r$ 和 $l$ )就能使其适应。如何在保持跟踪效果的条件下提高机器人的速度,以及提升跟踪复杂陡峭曲线的效果将是下一步的研究方向。

## 参考文献

[1] 岳占富,崔平远,崔祜涛. 基于改进蚁群算法的星球探测

机器人路径规划技术[J]. 控制与决策, 2006, 21(12): 1437-1440.

YUE Zhan-fu, CUI Ping-yuan, CUI Hu-tao. Planetary rover path-planning based on ant colony optimization algorithm [J]. Control and Decision, 2006, 21(12): 1437-1440.

[2] KANAYAMA I, YUTA S. Vehicle path specification by a sequence of straight lines[J]. IEEE Journal of Robotic and Automation, 1988, 4(3): 265-276.

[3] AMIDI O. Integer mobile robot control[R]. Pittsburgh: Carnegie Mello University Robotics Institute Technical Report CMU-RI-TR- 90-17. 1990: 27-31.

[4] KANAYAMA I, MIYAKE N. Trajectory generation for mobile robots[J]. Robotic Research, 1986, 3: 333-340.

[5] CROWLEY J. Asynchronous control of orientation and displacement in a robotic vehicle[C]//Proc IEEE Conference on Robotics and Automation. [S.l.]: IEEE Press, 1989: 1277-1282.

[6] 伍瑾斐,秦东兴,刘俊. 四轮式移动机器人非完整运动控制[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(2): 302-304.

WU Jin-fei, QIN Dong-xing, LIU Jun. Nonholonomic motion control of four-wheeled mobile robot[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(2): 302-304.

[7] SINGH S, SHIN D H. Position based path tracking for wheeled mobile robots[C]//Proc IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems. [S.l.]: IEEE Press, 1989: 386-391.

[8] KANAYAMA Y, NILIPOUR A, LELM C. A locomotion control method for autonomous vehicles[C]//IEEE Conference on Robotics and Automation. Cincinnati: IEEE Press, 1990: 384-389.

[9] OLLERO A, AMIDI O. Predictive path tracking of mobile robots[D]. Pittsburgh, USA: Carnegie Mello University, 2003.

[10] LINDGREN D R, HAGUE T, PROBERT SMITH P J. Relating torque and slip in an odometric model for an autonomous agricultural vehicle[J]. Autonomous Robots, 2002, 13: 73-86.

[11] MUÑOZ V, OLLERO A, SIMÓN A, et al. Mobile robot trajectory planning with kinematic and dynamic constraints[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. California: IEEE Press, 1994.

[12] DADIOS E P, MARAVILLAS Jr O A. Cooperative mobile robots with obstacle and collision avoidance using fuzzy logic[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Vancouver, Canada: IEEE Press, 2002: 227-332.

编辑 黄 莘