

# 多移动机器人的队形控制<sup>①</sup>

李 强, 刘国栋

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

**摘 要:** 针对步行机器人建模困难和传感信息有限的条件下对其进行的队形控制研究。通过建立机器人的队形位置信息知识库, 制定有优先级的组队参考机器人选择规则, 结合有限的传感交互信息, 提出了基于主从知识联想的平行四边形法来确定机器人的运动向量, 使跟随机器人在虚构的平行四边形中分析出其下一步的偏转角和速度, 并在偏转角和速度的分析中考虑了时延和适当的控制周期。在机器人队形控制过程中的避障问题则采用模糊控制理论, 依据人为经验制定的模糊避障控制规则使机器人灵活的避开障碍, 仿真实验证明了算法的有效性。

**关键词:** 步行机器人; 队形; 知识库; 平行四边形法; 模糊控制

## Formation Control of Multiple Mobile Robots

LI Qiang, LIU Guo-Dong

(College of Internet of Things and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** This article conducts the formation control research of walking robot under the modelling difficulty and the sensing information limited. Through establishing the robot's knowledge library about the formation positional information, based on the priority selective rule to the reference robot, and unifying the limited sensing interactive information, it proposes the host from the knowledge association parallelogram law to obtain the movement vector, the follow robots analysis the next deflection and speed in the fiction parallelogram, and considers the time delay and appropriate control cycle in the analysis. And uses the fuzzy control theory in the robot formation control process, rests on the artificial experience to avoid obstacles by fuzzy control rules, the robots avoid obstacles flexibly. The simulation results show the effectiveness of the algorithm.

**Keywords:** walking robot; formation; knowledge library; parallelogram method; fuzzy control;

## 1 引言

多机器人的编队控制已成为多机器人系统研究的热点, 经过编队的系统具有降低成本、增强鲁棒性和有效性等优点, 被广泛应用于军事, 航空航天和工业制造等<sup>[1]</sup>。国外在多机器人队形研究方面开展的较早, 美国研究机构 Georgia Tech Mobile Robot Lab 结合 DARPA 的 UGV Demo II 研究了基于行为的队形控制方法<sup>[2]</sup>, University of Southern California 的 Robotics Research Lab 利用局部传感信息和交互进行队形控制<sup>[3]</sup>, 研究基于局部传感和控制的队形实现。当前比较成熟的队形控制方法有领

航法<sup>[4]</sup>、虚拟结构法<sup>[5]</sup>、基于行为法<sup>[6]</sup>、图论法及虚拟势场力法<sup>[7]</sup>等。目前关于机器人的队形控制多是建立在运动学方程上实现的, 如轮式机器人, 其队形控制通常灵活、精确, 队形维持较好, 而步行机器人结构复杂, 非线性较强, 运动学方程难以建立, 因此仅仅利用有限的局部传感信息对步行机器人进行队形控制的研究较少, 步行机器人队形控制的关键在于如何得到运动向量, 本文提出了一种基于主从知识联想的平行四边形法用于步行机器人的队形控制, 并在机器人的避障策略上采用模糊控制的方法。

① 收稿时间:2010-07-31;收到修改稿时间:2010-09-20

## 2 队形控制算法

在没有严格控制方程的情况下如何通过有限的信息来实现步行机器人的队形控制，这里提出了构造人为经验知识作为机器人的直接队形控制方法，即综合考虑跟随机器人相对参考机器人的不同方位和跟随机器人的目标位置相对其不同的方位，利用基本的传感信息归纳出在上述情况下对应区域的边角控制规律并得出对应运动向量的控制方法。当然在作上述分析之前，机器人首先要确定参考机器人并能知道相对其在队形中的距离和方位角即所谓的队形知识，以下为具体的实现方法。

### 2.1 参考机器人的确定方法

记  $R$  为所有机器人组成的集合，设集合  $q_0 = \{R_i \in R \mid R_i \text{ 看到 leader}\}$ ， $q_1 = \{R_i \in R - q_0 \mid R_i \text{ 看到 } R_j, R_j \in q_0\}$ ， $q_2 = \{R_i \in R - q_0 \cup q_1 \mid R_i \text{ 看到 } R_j, R_j \in q_1\}$ ， $\dots$ ， $q_{l-1} = \{R_i \in R - q_0 \cup q_1 \cup q_2 \dots \cup q_{l-2} \mid R_i \text{ 看到 } R_j, R_j \in q_{l-2}\}$ ， $q_l = \{R - q_0 \cup q_1 \cup q_2 \dots \cup q_{l-2}, \cup q_{l-1}\}$ 。  $q_0, q_1, \dots, q_l$  为  $R$  的划分， $q_0$  为直接看到 leader 的机器人集合， $q_1, \dots, q_l$  为间接看到机器人 leader 的集合<sup>[8]</sup>。规定机器人选择 leader 的优先级  $q_0$  到依次降低，follower 也可当做其它 follower 的参考 leader。这样就形成了由最初的低优先级 leader 的选择到高优先级 leader 选择的自动更替，同级 leader 随机选择，这样有利于队形的加快收敛和精度的提高。

### 2.2 队形知识库的建立

队形控制就是使机器人相互按照一定的距离角度关系行进的控制，因此距离和角度知识就是最基本的队形位置信息。设机器人集  $R_i (0 \leq i \leq n-1)$  其中  $R_0$  为 leader，则所有机器人彼此的相对位置矩阵（队形知识库）如下：

$$[F_{ij}]_{(n-1)n} = \begin{matrix} & R_0 & R_1 & R_2 & \dots & R_{n-1} \\ \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_{n-1} \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{10}, \phi_{10} & 0 & d_{12}, \phi_{12} & \dots & d_{1(n-1)}, \phi_{1(n-1)} \\ d_{20}, \phi_{20} & d_{21}, \phi_{21} & 0 & \dots & d_{2(n-1)}, \phi_{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{(n-1)0}, \phi_{(n-1)0} & d_{(n-1)1}, \phi_{(n-1)1} & d_{(n-1)2}, \phi_{(n-1)2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中， $d_{ij}, \phi_{ij}$  为机器人  $i$  在队形中相对其它机器人  $j$  的距离和方位角，矩阵中的每一行为机器人在队形中相对其它机器人的位置信息，即该机器人的知识库。

### 2.3 主从知识联想的平行四边形推理方法

思想如下：首先 leader 向 follower 发布其航向角，follower 调整成与 leader 统一的航向角，之后的循环若 leader 航向角发生变化则发布航向角，否则各跟随机器人航向角不变，从 3.1 可以确定除 leader 外每个机器人的参考组队机器人，从 3.2 可以确定自己在队形中相对选定的参考机器人的目标位置即距离  $d_{ij}$  和方位角  $\phi_{ij}$ ，通过传感器获知选定的参考机器人相对于自己当前的位置即距离  $d$  和方位角  $\alpha$ ，当前跟随机器人将以上得到的两矢量为两相邻边联想构成虚拟的平行四边形，利用几何关系求出当前机器人相对参考机器人的目标位置向量，再将求出的目标矢量与统一的航向向量  $V$  相加（考虑其滞后性），最终得到当前跟随机器人的位置向量  $U$ 。

跟随机器人相对选定的 leader 参考机器人的位置具有镜像性，因此这里仅分析跟随机器人在选定的参考机器人的右侧情况（包括正前和正后方），依据已知的  $d, \alpha, d_{ij}, \phi_{ij}$  给出如下定义：

定义 1. 面域：跟随机器人在选定的参考机器人的右侧，符合  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  的集合区域用  $G$  表示；符合  $90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$  的集合区域用  $V$  表示；将目标位置在异侧的集合区域用  $C$  表示；面域  $S = \{V, G, C\}$ 。

定义 2. 线域：跟随机器人在选定的参考机器人的右侧符合  $\alpha = 0^\circ$  或  $\alpha = 180^\circ$  的集合区域用  $L_4$  表示；符合  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  且  $180^\circ - \alpha = \phi_{ij}$  的集合区域用  $L_1$  表示；符合  $\alpha = 90^\circ$  的集合区域用  $L_2$  表示；符合  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  且  $180^\circ - \alpha = \phi_{ij}$  的集合区域用  $L_3$  表示；符合  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ， $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$  的集合区域用  $L_{43}$  表示；符合  $\alpha = 90^\circ$ ， $d = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$  的集合区域用  $L_{42}$  表示；符合  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ， $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$  的集合区域为  $L_{41}$ ；线域  $L = \{L_1, L_2, L_3, L_4, L_{41}, L_{42}, L_{43}\}$ 。

规定 1. 跟随机器人在选定的参考机器人的右侧，目标位置在面域  $C$  内则  $\varphi$  左转，否则若  $|d \sin \alpha| > |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ，则求得的  $\varphi$  左转；若  $|d \sin \alpha| < |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ，则求得的  $\varphi$  右转。

设跟随机器人相对参考机器人的位置为  $L_{R_f}$ ，跟随机器人相对参考机器人的目标位置为  $L'_{R_f}$ ，则  $L'_{R_f}$  在面域和线域内相对  $L_{R_f}$  和参考机器人的区域划分如图所

示:

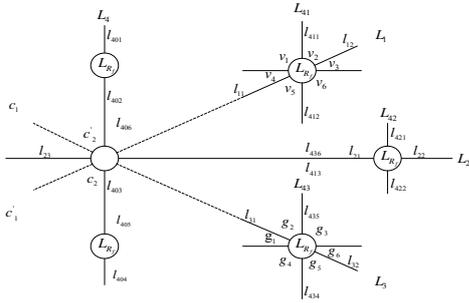
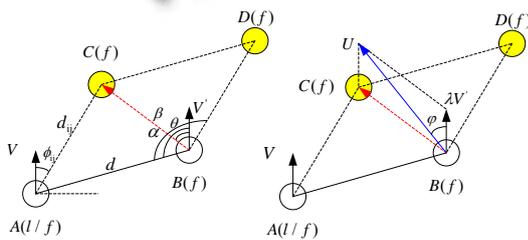


图 1 标位置在和内的区域划分

则  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$ ;  $G = \{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6\}$ ;  
 $C = \{c_1, c_2, c'_1, c'_2\}$ ;  $L_1 = \{l_{11}, l_{12}\}$ ;  $L_2 = \{l_{21}, l_{22}, l_{23}\}$ ;  
 $L_3 = \{l_{31}, l_{32}\}$ ;  $L_4 = \{l_{401}, l_{402}, l_{403}, l_{404}, l_{405}, l_{406}\}$ ;  
 $L_{41} = \{l_{411}, l_{412}, l_{413}\}$ ;  $L_{42} = \{l_{421}, l_{422}\}$ ;  $L_{43} = \{l_{434}, l_{435}, l_{436}\}$ 。

子区域分析如下:

$v_1 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in v_1\}$ , 构成虚拟的平行四边形如图示:



(a) 标位置的向量图 (b) 最终的运动向量图

图 2 跟随机器人联想虚构的平行四边形

$V, V'$  为航向向量,  $A(l/f)$  和  $B(f)$  分别为选定的参考机器人和当前机器人,  $C(f)$  和  $D(f)$  为  $B$  的目标位置分别相对  $A$  和  $B$  时的位置,  $U$  为当前机器人最终的目标位置向量,  $\varphi$  为当前机器人应调整的角度, 令  $\alpha = \angle V'BA$ ,  $\theta = \angle V'BC$ ,  $\beta = \angle ABD$ 。由图(a)知,  
 $(180^\circ - \alpha) > \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| > |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

则  $\beta = \alpha + \phi_{ij}$ ,  $\overline{BC} = \overline{BA} + \overline{AC}$ ;  
 $|\overline{BC}|^2 = |\overline{AB}|^2 + |\overline{AC}|^2 - 2|\overline{AB}||\overline{AC}|\cos(\pi - \beta)$  (1)

$\angle ABC = \cos^{-1}[(|\overline{BA}|^2 + |\overline{BC}|^2 - |\overline{AC}|^2) / 2|\overline{BA}||\overline{BC}|]$  (2)  
 $\theta = \alpha - \angle ABC$ ;

由图(b)知,  $U = \overline{BC} + \lambda V'$ ;  
 $|U|^2 = |\overline{BC}|^2 + |\lambda V'|^2 - 2\lambda|\overline{BC}||V'| \cos \theta$  (3)

$\varphi = \cos^{-1}[(|U|^2 + |\lambda V'|^2 - |\overline{BC}|^2) / 2\lambda|U||V']$  (4)

以下对其它子区域采用相同的分析方法并归纳:

$v_2 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in v_2\}$ ,  $g_3 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in g_3\}$ ,

$g_6 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in g_6\}$ ;  
 则  $(180^\circ - \alpha) > \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| < |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$\beta = \alpha + \phi_{ij}$ ,  $\theta = \angle ABC - \alpha$ ;

$v_3 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in v_3\}$ ,  $v_6 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in v_6\}$ ,  
 $g_5 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in g_5\}$ ;

则  $(180^\circ - \alpha) < \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| < |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$\beta = 360^\circ - (\alpha + \phi_{ij})$ ,  $\theta = 360^\circ - (\alpha + \angle ABC)$ ;

$v_4 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in v_4\}$ ,  $g_2 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in g_2\}$  同  $v_1$  相同。

$v_5 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in v_5\}$ ,  $g_1 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in g_1\}$ ,  
 $g_4 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in g_4\}$ ;

则  $(180^\circ - \alpha) < \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| > |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$\beta = 360^\circ - (\alpha + \phi_{ij})$ ,  $\theta = \alpha + \angle ABC$ ;

$c_1 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in c_1\}$ ,  $c'_1 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in c'_1\}$

则  $\alpha \geq \phi_{ij}$ ;  $\beta = \alpha - \phi_{ij}$ ,  $\theta = \alpha - \angle ABC$ ;

$c_2 = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in c_2\}$ ,  $c'_2 = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in c'_2\}$

则  $\alpha < \phi_{ij}$ ;  $\beta = \phi_{ij} - \alpha$ ,  $\theta = \alpha + \angle ABC$ ;

将以上得到的  $\beta, \theta$  代入式(1)(2)(3)(4)求得  $|U|, \varphi$ 。

子区域分析如下:

$l_{11} \cup l_{21} = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in l_{11} \cup l_{21}\}$ ,  $l_{31} = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in l_{31}\}$ ;

则  $(180^\circ - \alpha) = \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| > |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$|\overline{BC}| = d - d_{ij}$ ,  $\theta = \alpha$  由式(3)(4)可得  $|U|, \varphi$ 。

$l_{12} \cup l_{22} = \{L_{R_f} \in V, L'_{R_f} \in l_{12} \cup l_{22}\}$ ,  $l_{32} = \{L_{R_f} \in G, L'_{R_f} \in l_{32}\}$ ;

则  $(180^\circ - \alpha) = \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| < |d \sin \phi|$ ;

$|\overline{BC}| = d_{ij} - d$ ,  $\theta = \phi_{ij}$  由式(3)(4)可得  $|U|, \varphi$ 。

$l_{401} = \{L_{R_f} \in L_4, L'_{R_f} \in l_{401}\}$ ;

则  $\alpha = 180^\circ$ ,  $\phi_{ij} = 0^\circ$ ,  $d \leq d_{ij}$ ;

$|U| = d_{ij} - d + |\lambda V'|$ ,  $\varphi = 0^\circ$ 。

$l_{402} = \{L_{R_f} \in L_4, L'_{R_f} \in l_{402}\}$ ;

则  $\alpha = 180^\circ$ ,  $\phi_{ij} = 0^\circ$ ,  $d > d_{ij}$ ;

$|U| = d - d_{ij} - |\lambda V'|$ ,  $\varphi = 180^\circ$ 。

$l_{403} = \{L_{R_f} \in L_4, L'_{R_f} \in l_{403}\}$ ;

则  $\alpha = 180^\circ$ ,  $\phi_{ij} = 180^\circ$ ;  $|\overline{BC}| = d_{ij} + d$ ,  $\theta = 90^\circ$ ;

由式(3)(4)可得  $|U|, \varphi$ 。

$l_{404} = \{L_{R_f} \in L_4, L'_{R_f} \in l_{404}\}$ ;

则  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\phi_{ij} = 180^\circ$ ,  $d < d_{ij}$ ;

$$|U| = d_{ij} - d - |\lambda V'|, \quad \varphi = 180^\circ.$$

$$l_{405} = \{L_{R_f} \in L_4, \dot{L}_{R_f} \in l_{405}\};$$

则  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\phi_{ij} = 180^\circ$ ,  $d > d_{ij}$ ;

$$|U| = d - d + |\lambda V'|, \quad \varphi = 180^\circ.$$

$$l_{406} = \{L_{R_f} \in L_4, \dot{L}_{R_f} \in l_{406}\};$$

则  $\alpha = 0$ ,  $\phi_{ij} = 0^\circ$ ,  $|\overline{BC}| = d_{ij} + d$ ,  $\theta = 0^\circ$ ;

由式(3)(4)可得  $|U|$ ,  $\varphi$ 。

$$l_{411} \cup l_{421} = \{L_{R_f} \in V, \dot{L}_{R_f} \in l_{411} \cup l_{421}\};$$

则  $(180^\circ - \alpha) > \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$$|U| = d_{ij} \cos \phi_{ij} - d \cos(\pi - \alpha) + |\lambda V'|, \quad \varphi = 0^\circ.$$

$$l_{412} = \{L_{R_f} \in V, \dot{L}_{R_f} \in l_{412}\};$$

则  $(180^\circ - \alpha) < \phi_{ij} < 90^\circ$ ,  $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$$|U| = d \cos(\pi - \alpha) - d_{ij} \cos \phi_{ij} - |\lambda V'|, \quad \varphi = 180^\circ.$$

$$l_{413} \cup l_{422} = \{L_{R_f} \in V, \dot{L}_{R_f} \in l_{413} \cup l_{422}\};$$

则  $\phi_{ij} \geq 90^\circ$ ,  $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$$|U| = d \cos(\pi - \alpha) + d_{ij} \cos(\pi - \phi_{ij}) - |\lambda V'|, \quad \varphi = 180^\circ.$$

$$l_{434} = \{L_{R_f} \in G, \dot{L}_{R_f} \in l_{434}\};$$

则  $(180^\circ - \alpha) < \phi_{ij}$ ,  $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$$|U| = d_{ij} \cos(\pi - \phi_{ij}) - d \cos \alpha - |\lambda V'|, \quad \varphi = 180^\circ.$$

$$l_{435} = \{L_{R_f} \in G, \dot{L}_{R_f} \in l_{435}\};$$

则  $90^\circ < \phi_{ij} < (180^\circ - \alpha)$ ,  $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$$|U| = d \cos \alpha - d_{ij} \cos(\pi - \phi_{ij}) + |\lambda V'|, \quad \varphi = 0^\circ.$$

$$l_{436} = \{L_{R_f} \in G, \dot{L}_{R_f} \in l_{436}\};$$

则  $\phi_{ij} < 90^\circ$ ,  $|d \sin \alpha| = |d_{ij} \sin \phi_{ij}|$ ;

$$|U| = d \cos \alpha + d_{ij} \cos \phi_{ij} + |\lambda V'|, \quad \varphi = 0^\circ.$$

机器人运动速度的控制:

$$V = a_1 \gamma_1 v_{\max} + a_2 \gamma_2 v_{\max} + a_3 \gamma_3 v_{\text{leader}} + a_4 \gamma_4 v_{\text{leader}}$$

其中当  $0 \leq |U| < d_1$  时:  $a_4 = 1$ ,  $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ ,

$$\gamma_4 = \begin{cases} 1 & t < t_0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases};$$

当  $d_1 \leq |U| < d_2$  时:  $a_3 = 1$ ,  $a_1 = a_2 = a_4 = 0$ ;

$$\gamma_3 = \begin{cases} 1 & t < [(|U| - d_1) / v_{\text{leader}} + \Delta t_2] \\ 0 & \text{其它} \end{cases};$$

当  $d_2 \leq |U| < a$  时:  $a_2 = 1$ ,  $a_1 = a_3 = a_4 = 0$ ;

$$\gamma_2 = \begin{cases} 1 & t < (|U| / v_{\max} + \Delta t_1) \\ 0 & \text{其它} \end{cases};$$

当  $|U| \geq a$  时:  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = a_3 = a_4 = 0$ ;

$$\gamma_1 = \begin{cases} 1 & t < \xi |U| / v_{\max} \\ 0 & \text{其它} \end{cases};$$

( $0 < \xi \leq 1$ ) 为  $|U| \geq a$  时跟踪时间的调整参数,  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $t_0$  为补偿时间,  $t$  可调时间参数, 为延时时间,  $v_{\text{leader}}$ ,  $v_{\max}$  分别为领航机器人的速度和跟随机器人的最大速,  $d_1 < d_2 < a$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  为距离目标位置的速度和延时变换的控制半径。

### 3 避障控制方法

模糊控制避障规则的制定原则:

1) 速度的确定: 速度一般依据机器人与障碍间的方位和距离制定, 对于避障活动障碍还要参考障碍相对机器人的运动夹角。

2) 偏转角的确定: 无论静态还是动态障碍的避障, 首先依据障碍的方位和距离制定出相应的偏转角, 但是对于活动障碍还须依据相应方位上的障碍与机器人的运动夹角再结合人为经验的基础上制定出有效的模糊控制规则, 避障的偏转方向尽量朝向奔向目标的前向方向。

3) 当感知到小于机器人安全距离的障碍物, 队形控制让步于避障, 超出安全距离继续队形控制过程, 动静障碍同时存在时, 距离近的先执行。

#### 3.1 避障活动障碍物

模糊控制系统<sup>[9]</sup>的输入量有三个即: 活动障碍相对机器人的方位角  $\varphi$  及两者间的运动方向夹角  $\theta$ , 以机器人正前方为极轴, 逆时针为负, 顺时针为正, 范围为  $(-180^\circ \sim +180^\circ)$ ; 活动障碍物与机器人之间的距离  $d$ 。输出量有两个即速度  $v$  和转角  $\phi$ , 其中转角的偏转范围为  $(-90^\circ \sim +90^\circ)$ 。对以上输入输出量进行模糊论域划分, 方位角  $\varphi$  划分为  $\{SN$  (左上),  $MN$  (左中),  $LN$  (左下),  $Z$  (前方),  $SP$  (右上),  $MP$  (右中),  $LP$  (右下),  $VL$  (下方)}, 夹角  $\theta$  划分为  $\{VL, LN, MN, SN, Z, SP, MP, LP, VL\}$ , 距离  $d$  划分为  $\{VN, N, F\}$ , 速度  $v$  划分为  $\{SP, LP\}$ , 转角  $\phi$  划分为  $\{LN, MN, SN, Z, SP, MP, LP\}$ 。经过对各参数的不断调整和优化, 最终得出各输入输出量相应的隶属函数如图 3 所示:

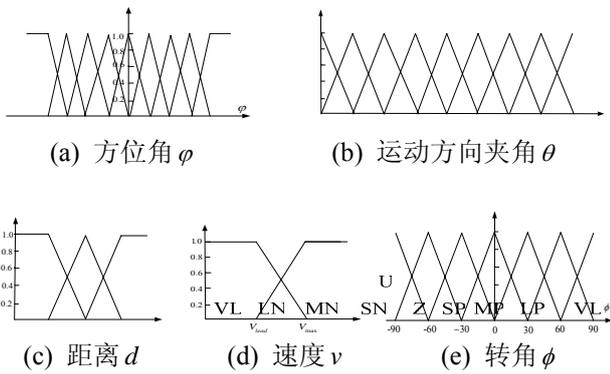


图 3 各输入输出量的隶属度函数

其中夹角  $\theta$  的 8 种情况在  $\phi$  的不同方位对机器人不全影响, 依据人为经验列出夹角  $\theta$  在机器人不同方位内对机器人有影响的区域如图 4 所示, 由对称性, 左面图示省略。经过整合总输出要小于  $(4+4*2+3*2+2*2+1)*2=46$ , 鉴于篇幅所限, 下面仅列出活动障碍在机器人右上时的输出转角  $\phi$  和速度  $v$  的模糊输出规则如表 1 所示:

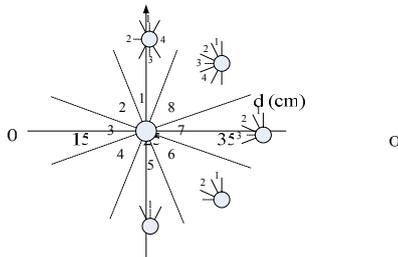


图 4 活动障碍的方位及运动方向区域划分

表 1 避障活动障碍的速度及转角模糊控制规则表

规则号	$\phi$	$\theta$	$d$	$v$	$\phi$
1	SP	Z	VN	LP	SN
2	SP	SN	VN	SP	LP
3	SP	MN	VN	LP	LP
4	SP	LN	VN	LP	MN
5	SP	Z	N	LP	Z
6	SP	SN	N	SP	MP
7	SP	MN	N	LP	MN
8	SP	LN	N	LP	SN

表 1 中, 活动障碍在右上方位, 其运动方向分别在区域 1、2、3、4 内且距当前机器人非常近及近时的模糊输出。

### 3.2 避障静止障碍物

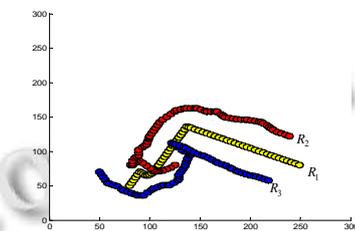
两个输入量即方位角  $\phi$  和距离  $d$ , 输入输出量的模糊划分同上。依据人为经验障碍在机器人右上时的模糊输出规则如表 2 所示:

表 2 避障静止障碍的速度及转角模糊控制规则表

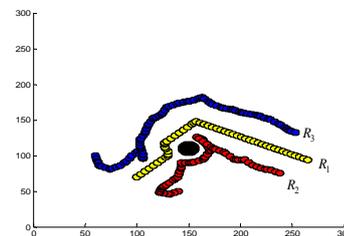
规则号	$\phi$	$d$	$v$	$\phi$
U <sub>1</sub>	VL LN	SP MN	VN	SP
1 <sub>2</sub>	SP	N	LP	Z

## 4 仿真

本文在 MATLAB m-file 下实现的仿真。选取三个机器人  $R_1, R_2, R_3$  分别以半径为 2 的小圆代指, 其中  $R_1$  为领航机器人 leader, 另两个为跟随机器人 follower, 领航机器人的步速为  $v_{leader}$ , 跟随机器人的步速分为最大步速  $v_{max}$  和常规步速  $v_{leader}$ , 其中  $v_{leader} < v_{max}$ 。在图 (a) 中三个机器人的初始位置为 (80, 50)、(125, 80)、(50, 70), 在图 (b) 中三个机器人的初始位置为 (100, 70)、(140, 50)、(60, 100), 机器人的正面方向可任意摆放。机器人的控制周期为 100ms, 在队形控制过程中领航机器人变换一次航向, 经过 137 次循环, 仿真结果如图 5 所示:



(a) 从机器人在异侧的队形控制



(b) 从机器人在同侧的队形控制

图 5 基于主从知识联想的平行四边形队形控制

仿真图在图 5(a)中  $R_2, R_3$  在  $R_1$  的异侧, 起初  $R_2,$

$R_3$  搜寻到  $R_1$  并得到距其的距离和方位角, 通过文中提出的队形控制算法得到第一次循环的运动向量, 重复此过程,  $R_2$ ,  $R_3$  不断向自己在队形中位置奔去, 途中  $R_1$  和  $R_2$  依据避障活动障碍的模糊控制规则相互避碰, 在  $R_1$  运动方向发生变化时,  $R_2$ ,  $R_3$  较迅速的完成队形的维持; 图 5(b)中  $R_2$ ,  $R_3$  在  $R_1$  的同侧, 同样依据文中的算法, 每一次循环  $R_2$ ,  $R_3$  得到一次更新的运动向量, 不断的调整自己向理想的目标位置奔去, 途中  $R_1$  遇到障碍并依据避障静止障碍模糊控制规则避开, 接着  $R_2$  也遇到了此障碍并暂时放弃跟随  $R_1$  而采取避障行为, 在  $R_1$  变换运动方向后,  $R_2$ ,  $R_3$  较快的再次形成指定队形。

## 5 结论

本文针对步行机器人模型建立困难并且传感信息有限的情况下对其进行的队形控制研究。提出了基于主从知识联想的平行四边形法解决方案, 在脱离运动学方程的情况下, 依靠先验知识和有限的传感信息, 构造出虚拟的主从联想的位置关系平行四边形, 总结出不同的边角关系对应从机器人不同的位置, 从而得出不同位置直接对应得队形控制方法, 在队形控制要求不精确的前提下有较好的控制效果。此外, 应用模

糊控制理论, 基于人为经验制定的模糊避障控制规则可使机器人有效的避开动静障碍。

## 参考文献

- 1 王月海,洪炳熔.基于行为的机器人部队队形控制.机器人技术与应用,2001,4:28-32.
- 2 Balch T, Arkin RC. Behavior-based formation control for multi-robot teams. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1998,14(6):926-939.
- 3 Fredslund J, Mataric MJ. A general, local algorithm for robot formations. IEEE Trans. on Robotics Automation, 2002,18(5):837-846.
- 4 杨甜甜,刘志远,陈虹,裴润.移动机器人编队控制的现状与问题.智能系统学报,2007,8:21-24.
- 5 任德华,卢桂章.对队形控制的思考.控制与决策,2005,6:601-606.
- 6 杨丽,曹志强,谭民.不确定环境下多机器人的动态编队控制.机器人,2010,3:283-284.
- 7 熊举峰,谭冠政,窦宏全.基于虚拟力的群机器人队形控制.计算机工程与应用,2007,5:185-188.
- 8 韩学东,洪炳熔,孟伟.多机器人任意队形分布式控制研究.机器人,2003,1:66-71.
- 9 雷艳敏,朱齐丹,冯志彬.基于混合式控制结构的多机器人编队控制研究.计算机工程与应用,2010,11:49-51.
- 10 Lorensen WE, Cline HE. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics, 1987,21(4).
- 11 张季,王宜杰.医学图像三维重建方法的比较研究.医学信息,2006,19(5).
- 12 Max N. Optical models for direct volume rendering. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1, (2):99-108.
- 13 National Electrical Manufacturers Association (NE MA). 2009. Digital imaging and communications in medicine (DICOM), Part 1: Introduction and Overview. [2010-6]. [ftp://medical.nema.org/medical/dicom/2009/09\\_01pu.pdf](ftp://medical.nema.org/medical/dicom/2009/09_01pu.pdf)

(上接第 130 页)

机工程与应用,2006,30:183-184.

- 4 张翔,肖小玲,张爱华.基于 VTK 库的人脑三维可视化面绘制.长江大学学报,2006,3(1):75-76.
- 5 王树秀,雷声,常发亮.利用 VTK 实现 DICOM 医学图像三维重建.信息技术与信息化,2008,5:115-116.
- 6 Schroeder WJ. The VTK User's Guide (Vesmin 4.0).Kitware, Inc 1998:19-20.
- 7 王利.基于 VTK 的医学图像可视化研究及应用[硕士学位论文].泰安:泰山医学院,2009.
- 8 宋海友.基于 VTK 的医学图像三维重建及其可视化技术研究[硕士学位论文].成都:成都理工大学,2006.
- 9 胡战利.基于 VTK 的医学图像三维重建及交互研究.哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.