文章编号：1000−8152(2006)05−0692−07

非完整移动机器人的复合编队控制

陈余庆, 庄　严, 王　伟

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 主要研究了非完整自主机器人之间的队形保持和避障问题. 提出了一种新的复合编队控制方法, 该方法根据机器人的期望位置在其运动约束区域内外的不同, 分别以一种灵活的反馈线性化算法和最优近似目标算法来建立控制规则, 并提出了编队环境中存在静态障碍物时的队形控制策略, 从而实现多机器人的稳定编队控制. 该方法降低了传统线性反馈控制对编队初始误差范围的要求, 并且解决了非完整机器人编队的避障问题. 实验结果表明了该编队控制方法的可行性和有效性.

关键词: 队形保持; 反馈线性化; 避障; 非完整机器人

中图分类号: TP24　　**文献标识码**: A

Compound formation control for nonholonomic mobile robots

CHEN Yu-qing, ZHUANG Yan, WANG Wei

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: This paper investigates the characteristics of formation and obstacle avoidance for nonholonomic mobile robots. Firstly, a novel approach of compound control is presented, which deals with the formation task based on two different algorithms: a flexible feedback linearization algorithm and an optimal approximate target algorithms. These two algorithms are selected according to robot's desired position and the limitation of kinematic constraint domain. Secondly, the obstacle avoidance control strategy is discussed to achieve a steady formation under the unstructured circumstances. The proposed method can reduce the limitation of initial errors compared with traditional feedback linearization, and resolve the obstacle avoidance problem in multiple robots formation control. Finally, experimental results are given to demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: formation keeping; feedback linearization; obstacle avoidance; nonholonomic mobile robot

1 引言(Introduction)

多移动机器人编队控制是机器人协作技术中最基本和最重要的问题, 机器人之间的协调运动能力是完成诸如物体搬运、空间探索和搜索救援等协作任务的保证. 然而机器人协作控制的复杂性使多机器人技术的广泛应用成为一项具有挑战性的课题. 而大多数传统控制理论和动力学方法解决的是系统任务和模型确定的单一模型操作问题, 对于非结构动态环境下的多机器人控制需要新的理论和方法来实现.

多机器人编队控制的研究始于20世纪90年代. 目前, 编队控制研究可分为队形建立、队形保持、避障和队形变换等子问题. Francis等人分析了基于图形理论的特定队形建立方法, 并给出了传感有向图与编队稳定性的关系[1]. Balch和David研究了基于行为的队形保持和变换方法, 机器人的输出行为由许多反应式行为构成, 属于一种完全分布式控制策略, 该方法环境适应能力强, 但不易于用数学模型来描述分析[2,3]. Lewis等人了基于虚拟结构的编队方法, 以编队整体框架的运动来约束机器人位姿, 该方法编队精度高, 但是控制过于集中[4,5]. 席裕庚分析了最速编队控制问题[6]. Ostrowski等人研究了一种模型清晰的领队–跟随方法, 更易于应用运动学理论来分析和实现[7~10]. Desai分析了初始状态误差较小时的刚性编队控制问题[7]. 而在编队初始状态误差较大或遇到碰撞等干扰时, 其编队控制一致收敛速度慢, 特别是未考虑到跟随机器人的实际速度约束, 因此其编队稳定性和环境适应能力需要进一步改善.

本文考虑非完整机器人自身所具有的运动约束,

收稿日期: 2005−04−20; 收修改稿日期: 2005−10−31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60605023); 大连理工大学—中科院沈阳自动化研究所合作科研探索基金资助项目.

通过建立运动区域模型来实现约束区域划分, 同时对跟随机器人的期望目标位置进行估计, 其估计值与所划分区域的隶属关系构成复合控制算法的满映射条件. 与文献[7]中提出的单向跟随编队控制方法不同, 为提高编队控制的灵活性和鲁棒性, 本文提出一种具有双向跟随特性的反馈线性化控制算法, 同时该算法与最优近似目标算法相结合, 对不能满足精确编队条件的状态给出最优控制输入解, 并提出新的编队避障控制策略, 从而实现具有双向跟随特性的非刚性编队复合控制.

2　运动约束区域模型(Modeling of motion constraint domain)

非完整约束是指含有系统广义坐标导数且不可积的约束. 双轮差分驱动机器人是典型的受非完整约束的系统, 又称为非完整机器人. 非完整机器人R_n的局部坐标系定义为$C_n(n=1,2,\cdots)$, 世界坐标系定义为C_0. 非完整机器人R_n的非线性运动学模型为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_n(t)\\ \dot{y}_n(t)\\ \dot{\theta}_n(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta(t) & 0\\ \sin\theta(t) & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_n(t)\\ \omega_n(t)\end{bmatrix}. \tag{1}$$

其中: $x_n(t), y_n(t)$表示R_n在C_0中的坐标值, $\theta_n(t)$为R_n的方向角, 且$(x_n, y_n, \theta_n)\in SE(2)$, $v_n(t)$和$\omega_n(t)$分别表示R_n控制输入u 的线速度和角速度分量, 即$u(t)=[v(t)\ \ \omega(t)]^{\mathrm{T}}$[11].

在实际机器人编队任务中, 机器人的运动线速度和角速度存在极限, 所以把非完整机器人在单位控制周期内所能够到达的区域定义为运动约束区域. 这样, 机器人R_j跟随机器人R_i时, 准确获得R_j的跟随约束区域很有意义.

机器人R_j的左右轮转速满足约束关系

$$\begin{cases}v_{\mathrm{l}}=v_j+a\omega_j/2,\\ v_{\mathrm{r}}=v_j-a\omega_j/2,\end{cases} \tag{2}$$

其中a为驱动轮间距. 如果驱动轮的最大线速度为V, 则机器人的线速度v_j和角速度ω_j同时满足条件$-V\leqslant v_j+a\omega_j/2\leqslant V$和$-V\leqslant v_j-a\omega_j/2\leqslant V$定义的变量约束区域$D_j$, 即$u_j\in D_j$. 从而区域边界满足速度约束关系

$$v=(V-a\omega_j\cdot\mathrm{sgn}(\omega_j)/2)\cdot\mathrm{sgn}(v_j). \tag{3}$$

为了降低编队轨迹规划的复杂性, 编队控制命令只与当前状态和一步预测状态有关. 而任意一段短时间内的运动轨迹都可以用圆弧曲线来近似逼近[12], 因此非完整运动约束区域可以用递推参数方程表示. 机器人在自身机器人坐标系下, t时刻的位姿满足方程

$$\begin{aligned}&x=v_j\cdot\sin(\omega_j t)/\omega_j,\\ &y=v_j\cdot(1-\cos(\omega_j t)/\omega_j),\\ &\theta=\omega_j t/2.\end{aligned}$$

把方程(3)带入上式, 有差分驱动机器人R_j的跟随约束区域边界曲线c_f模型方程

$$\begin{cases}x_c=\ (V-a\omega_j\cdot\mathrm{sgn}(\omega_j)/2)\cdot\sin\omega_j T\cdot\\ \qquad\mathrm{sgn}(v_j)/\omega_j,\\ y_c=\ (V-a\omega_j\cdot\mathrm{sgn}(\omega_j)/2)\cdot(1-\\ \qquad\cos\omega_j T)\cdot\mathrm{sgn}(v_j)/\omega_j.\end{cases} \tag{4}$$

因此在控制输入u_j作用下, R_j的运动约束区域F_j为对称的两部分心形区域, 见图1.

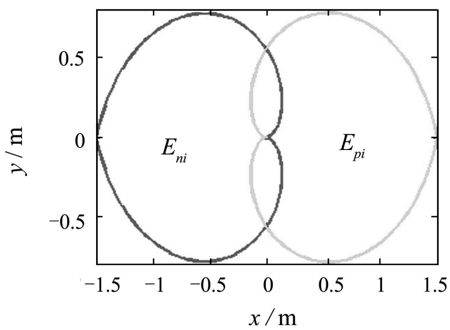


图 1　运动约束区域F_j

Fig. 1　Motion constraint domain F_j

当$\omega_j=0$时, 边界方程满足其极限形式, 即$x_c=\pm VT, y_c=\theta_j=0$. 图1中的右边心形线内部为$v_j>0$时的机器人跟随约束区域, 左边心形线内部为$v_j<0$时机器人跟随约束区域. 因此跟随约束区域划分为3个部分: 正向内域E_{pi}、负向内域E_{ni}和外域E_o. 在单周期T内, 机器人的最大转角$\alpha_{\max}$为$2VT/\alpha$, 最大距离$d_{\max}=VT$.

3　复合编队控制算法(Compound formation control algorithm)

3.1　跟随期望目标位置估计(Following desired-target estimation)

在领队–跟随控制中, R_j以期望距离l_{d}和期望角度φ_{d}跟随R_i, 见图2. 参数d_i和d_j分别为机器人R_i和R_j两驱动轮中点到编队参考点h_i 和h_j 的距离. 根据协作任务需要和机器人车体结构的不同, 编队参考点可转移到车体对称轴线上的其他位置, 从而提高编队控制的灵活性.

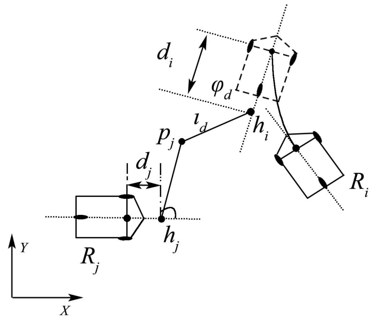


图 2　跟踪目标位置预测

Fig. 2　Following desired-target estimation

在离散时间k, 由R_j和R_i的相对位姿与控制状态, 建立$k+1$时刻的目标位置估计模型

$$S_i(k+1/k) = f(u_i(k)) + g(d_i, l_{\rm d}, \varphi_{\rm d}), \tag{5}$$

$$P_j(k+1/k) = Ref_{C_i-C_j}(S_i(k+1)) + h(r(k), d_j). \tag{6}$$

其中: $f(\cdot)$为领队机器人的轨迹控制函数, $g(\cdot)$为跟随参考点的转移函数; $Ref_{C_i-C_j}(\cdot)$为C_i到C_j的坐标系变换函数, $h(\cdot)$为跟随参考点的转移补偿函数. 因为R_i满足非完整运动的约束方程(1), 因此在坐标系C_i中, k+1时刻的跟随目标位置$S_i(k$+1)满足方程

$$\begin{cases} x_{S_i}(k+1/k) = v_i(k)\cdot\sin(\omega_i(k)T)/\omega_i(k) - \\ \qquad l_{\rm d}\cdot\cos\xi(k) - d_i\cdot\cos(\omega_i(k)T), \\ y_{S_i}(k+1/k) = v_i(k)\cdot(1-\cos\omega_i(k)T)/\omega_i(k) - \\ \qquad l_{\rm d}\cdot\sin\xi(k) - d_i\cdot\sin(\omega_i(k)T), \\ \xi(k) = \omega_i(k)T + \varphi_{\rm d} - \pi. \end{cases} \tag{7}$$

点$S_i(k+1)$从坐标系C_i变换到坐标系C_j下, 得到期望目标点$P_j(k+1)$,

$$\begin{cases} x_{p_j}(k+1/k) = x_m(k) + x_{S_i}(k+1)\cdot\cos(\beta(k)) - \\ \qquad y_{S_i}(k+1)\cdot\sin(\beta(k)) + \varepsilon_x, \\ y_{p_j}(k+1/k) = y_m(k) + x_{S_i}(k+1)\cdot\sin(\beta(k)) + \\ \qquad y_{S_i}(k+1)\cdot\cos(\beta(k)) + \varepsilon_y. \end{cases} \tag{8}$$

上式中$x_m(k)$, $y_m(k)$和$\beta(k)$表示k时刻机器人R_i在C_j下的位姿; ε_x和ε_y为参考点的转移补偿项, 并且$\varepsilon_x = \pm d_j\cos r$, $\varepsilon_y = \pm d_j\sin r$. 当$R_i$在$R_j$的左方时$\varepsilon_x$和$\varepsilon_y$ 取正号, 否则取负号. $P_j(k+1)$即为$k+1$时刻R_j在C_j中的跟随期望目标点.

3.2 反馈线性化控制算法(Feedback linearization control algorithm)

如果编队运动学模型的广义坐标数与控制输入向量维数相同, 那么就可以用非线性的状态反馈控制律把编队运动学模型转化为线性系统.

为保持系统稳定性, 领队机器人R_i的线速度一般满足条件$v_i \in [0, V]$, 而跟随机器人R_j的线速度满足$v_j \in [-V, V]$, 从而R_j可以采用正反两种方向的跟随形式. 文献[8]中的$l-\varphi$编队控制方法中, 跟随机器人仅采用前向跟随的单一编队控制模式. 在提出的编队控制方法中, 考虑了跟随机器人方向与到期望目标位置的偏离角度大小(见图 2), 并据此确定机器人跟随方向. 编队运动学方程满足方程(9)～(11).

$$\delta_j = \begin{cases} -V(|\gamma|-\pi/2)n/\pi - v_j + V, v_j \geqslant 0, \\ -V(|\gamma|-\pi/2)n/\pi - v_j - V, v_j < 0, \end{cases}$$
$$-\pi < \gamma \leqslant \pi, \tag{9}$$

$$\dot{l} = v_j\cos(\theta_i - \theta_j + \varphi) - v_i\cos\varphi + d_j\delta_j\omega_j\sin(\theta_i - \theta_j + \varphi)/|\delta_j| - d_i\omega_i\sin\varphi, \tag{10}$$

$$\dot{\varphi} = v_i\sin\varphi/l - \omega_i - v_j\sin(\theta_i - \theta_j + \varphi)/l - d_i\omega_i\cos\varphi/l + d_j\delta_j\omega_j\cos(\theta_i - \theta_j + \varphi)/(|\delta_j|l). \tag{11}$$

上面动力学方程中, 具有下标i的参数为领队机器人参数, 而下标为j的参数为跟随机器人参数. 方程(9)中的δ_j为跟随方向因子. 方程(9)和(10)中的l, φ为跟随期望目标点相对于领队机器人的距离和角度大小. 参数d_i, d_j和$l_{\rm d}, \varphi_{\rm d}$的定义同3.1节, n为正整数且满足区间$n \in [1, +\infty]$, 方程(8)～(10)中的各变量都省略了时间参数.

方程(9)为方向因子δ_j与方向偏离角γ的约束关系式, 取$\dot{l} = k_1(l_{\rm d} - l)$, $\dot{\varphi} = k_2(\varphi_{\rm d} - \varphi)$($k_1, k_2$为比例常数). 并把$\delta_j$带入规则(10)(11)中, 变换得到双向跟随控制输入u_j的显式形式

$$u_j = A + Bu_i, \tag{12}$$

显然A和B是关于l, φ的矩阵函数. 矩阵B非奇异, 并且辅助输入u_i维数与u_j维数相同. 方程(10)和(11)中δ符号的变化会改变机器人的跟随方向. 只要$\delta \geqslant 0$时, 跟随机器人在上述控制算法的作用下, 就会采取正向跟随的控制模式. 由控制规则方程可见, 选择正向跟随的状态有两种: 一是跟随机器人正向运动并趋近于期望目标点; 或者跟随机器人虽然背离期望目标点运动, 但其当前速度小于缓冲速度极值$V\cdot(\mathrm{sgn}(v_j) - \rho n/\pi)$, 其中$\rho = |\gamma| - \pi/2 \in (0, \pi/n)$为缓冲角, 缓冲角降低了速度突变造成的不稳定影响. 其他状态下, 机器人R_j反向跟随R_i.

可见, δ_j 的引入使跟随机器人同时具有前向跟随和反向跟随的两种运动控制模式, 从而使期望目标点的偏离角度误差相对减小, 增强了队形保持任务的灵活性和快速性.

3.3　最优近似目标算法(Optimal approximate target algorithm)

当$P_j \in E_0$时, 跟随机器人R_j在单位周期内不能到达期望目标点. 传统的反馈线性化控制方法没有特别考虑这种情况, 本文以最优近似目标算法求取新的期望目标点.

过$P_j(x_{pj}, y_{pj})$做跟随约束区域边界曲线c_f切线的垂线l_p, 垂线方程满足

$$y = -\mathrm{ctan}(\omega_j T) \cdot (x - x_{pj}) + y_{pj}. \tag{13}$$

其中曲线c_f上的垂足坐标$G(x_v, y_v)$同时满足方程(4)和(13), 即

$$\begin{cases} y_v = -\mathrm{ctan}(\omega_j T) \cdot (x_v - x_{pj}) + y_{pj}, \\ x_v = (V - a\omega_j \cdot \mathrm{sgn}(\omega_j)/2) \cdot \\ \qquad \sin \omega_j T \cdot \mathrm{sgn}(v_j)/\omega_j, \\ y_v = (V - a\omega_j \cdot \mathrm{sgn}(\omega_j)/2) \cdot \\ \qquad (1 - \cos(\omega_j T)) \cdot \mathrm{sgn}(v_j)/\omega_j. \end{cases} \tag{14}$$

化简方程组(14)得到垂足点$G(x_v, y_v)$对应方程

$$\begin{aligned} &(V/\omega_j - a \cdot \mathrm{sgn}(\omega_j)/2) \cdot \mathrm{sgn}(v) = \\ &\mathrm{ctan}(\omega_j T) \cdot x_{pj} + y_{pj}. \end{aligned} \tag{15}$$

其中控制输入的符号函数是P_j坐标值的函数, 即

$$\begin{cases} \mathrm{sgn}(v_j) = \mathrm{sgn}(x_{pj}), \\ \mathrm{sgn}(\omega_j) = \mathrm{sgn}(x_{pj}) \cdot \mathrm{sgn}(y_{pj}). \end{cases} \tag{16}$$

把式(16)代入式(15), 并结合D_j边界直线方程, 得到跟随机器人R_j 的控制规则方程

$$\begin{cases} V \cdot \mathrm{sgn}(x_{pj})/\omega_j - a \cdot \mathrm{sgn}(y_{pj})/2 = \\ \mathrm{ctan}(\omega_j T) \cdot x_{pj} + y_{pj}, \\ v_j = V \cdot \mathrm{sgn}(x_{pj}) - a\omega_j \cdot \mathrm{sgn}(y_{pj})/2. \end{cases} \tag{17}$$

在方程(17)的所有解中,把满足$\min(|GP_j|)$的ω_j带入方程(13)得到的$G(x_v, y_v)$点, 即最优近似目标解. 而ω_j和v_j则为R_j的有效控制输入. 因此当跟随机器人不能到达期望目标点时, 它选择其最优近似目标点.

3.4　复合编队控制算法的实现(Implementation of compound formation control)

取$\omega_0 = (2/T)\arctan(y_{pj}/x_{pj})$, 并把$\omega_0$带入方程(4), 则有约束区域边界坐标值$J(x_e, y_e)$, 因此有目标点位置判断方程

$$\cos t(x_{pj}, y_{pj}) = \| P_j O_j \| - \| J O_j \| . \tag{18}$$

其中O_j为坐标系C_j原点. 当$\cos t(x_{pj}, y_{pj}) < 0$时, 期望目标点在运动约束区域内部, 即$p_j \in E_{pi} \cup E_{ni}$, 编队控制选择反馈线性化算法; 当$\cos t(x_{pj}, y_{pj}) > 0$时, P_j点在运动约束区域外部, 即$P_j \in E_o$, 编队控制选取最优近似目标算法; 当$\cos t(x_{pj}, y_{pj}) = 0$时, ω_0即为控制输入角速度. 上述控制规则符合满映射条件, 因此系统可控.

4　编队避障控制(Obstacle avoidance of formation)

存在静态障碍物的约束环境下, 非完整移动机器人的编队行为更为复杂. 编队机器人既要保持整体相对位姿关系, 又要合理的避开障碍物拦挡. 本文基于机器人与障碍物的距离和角度信息, 分别为领队机器人和跟随机器人建立障碍避免的动力学控制方法.

根据机器人到障碍物距离c_o的大小, 把编队环境分别定义为安全区域$A_s(c_o > c_{\max})$、避障区域$A_o(c_{\min} \leqslant c_o \geqslant c_{\max})$和障碍禁区$A_f(c_o < c_{\min})$3部分. 其中$c_{\min}, c_{\max}$分别为机器人距离障碍物的最小极限距离和进入避障区域的边界距离. 当机器人位于安全区域时, 编队保持无障碍的控制模式; 而当机器人进入避障区域后, 机器人选择本节提出的避障控制模式; 如果机器人已经进入障碍禁区, 则机器人立即采取停止和回退等紧急措施, 避免碰撞危险发生. 图3为编队机器人避障控制示意图, 其中β_i 和β_j分别为机器人R_i和R_j的当前方向到垂直于机器人方向的避障角度, 逆时针方向为角度正方向.

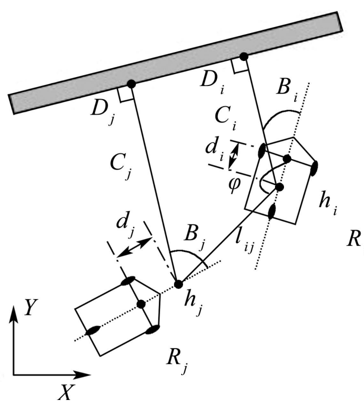


图 3　编队机器人避障控制

Fig. 3　Obstacle avoidance of formation

领队机器人R_i在向目标点运动过程中, 如果进入避障区域, 则其运动控制方程改变为

$$\alpha_i = \frac{c_i - c_{\max}}{c_{\max} - c_{\min}} v_{io}, \tag{19}$$

$$\dot{\beta}_i = -k_1^{'}\dot{\theta}_i = -k_1^{'}\omega_i,\ k_1^{'} > 0. \tag{20}$$

其中: c_i为机器人R_i到障碍物的距离, v_{io}为R_i当前时刻速度大小, $k_1^{'}$为正值比例常数. R_i的避障角度要求满足$\beta_i \to \pm\pi/2$, 同时为避免与障碍碰撞, 距离障碍物越近, 则其线速度越小. 定义$\dot{\beta}_i = \mathrm{sgn}(\beta_i)\cdot\pi/2 - \beta_i, \alpha_i = v_i - v_{io}$, 则有领队机器人的控制规则方程

$$\begin{cases} v_i = \dfrac{c_i - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} v_{io}, \\ \omega_i = k_1(\beta_i - \mathrm{sgn}\beta_i \cdot \pi/2). \end{cases} \tag{21}$$

其中$k_1 = 1/k_1^{'}$, v_i和ω_i为R_i的避障控制输入. 在避障区域内, 随着R_i与障碍物不断接近, 其线速度逐渐降低, 并且前进方向趋于与障碍物平行的方向. 当领队机器人R_i绕开障碍物, 即$(x_i, y_i) \notin A_o \cup A_f$后, 其控制转换为向目标点运动模式.

在领队机器人的带领下, 跟随机器人R_j进入障碍区域后, 既要保持与领队机器人R_i的距离, 又要避开障碍物, 因此R_j控制行为满足下面的距离和角度规则方程

$$\begin{aligned} \dot{l}_{ij} =& v_j\cos(\theta_i - \theta_j + \varphi) - v_i\cos\varphi + d_j\delta\omega_j\sin(\theta_i - \\ & \theta_j + \varphi)/|\delta| - d_i\omega_i\sin\varphi, \end{aligned} \tag{22}$$

$$\dot{\beta}_j = -k_2^{'}\dot{\theta}_i = -k_2^{'}\omega_j. \tag{23}$$

当参数$l_{ij} \to l_{\mathrm{d}}$, $\beta_j \to \pm\pi/2$时, 控制系统简化$\dot{l}_{ij} = k_2(l_{\mathrm{d}} - l_{ij})$, $\dot{\beta}_j = \mathrm{sgn}\beta_i\cdot\pi/2 - \beta_i$, 则有跟随机器人的控制规则方程

$$\begin{cases} \omega_j = k_1(\beta_i - \mathrm{sgn}\beta_i\cdot\pi/2), \\ v_j = \cos^{-1}(\theta_i - \theta_j + \varphi)(k_2(l_{\mathrm{d}} - l_{ij}) + \\ \qquad v_i\cos\varphi - d_i\delta\omega_j\sin(\theta_i - \theta_j + \varphi)/|\delta| + \\ \qquad d_i\omega_i\sin\varphi). \end{cases} \tag{24}$$

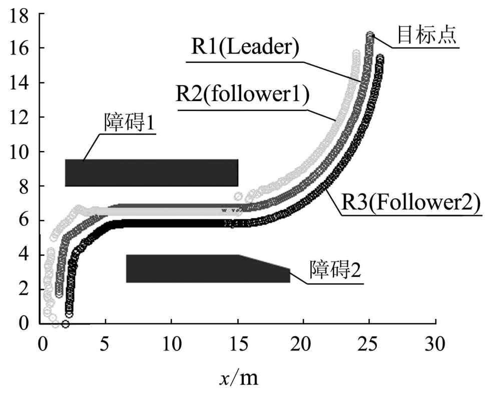
在避障输入$u_j(v_j, \omega_j)$控制下, R_j既与领队机器人保持恒定距离, 同时其运动又趋向平行于障碍物的方向, 从而实现稳定避障控制. 同样当机器人R_j与障碍物距离大于$c_{\max}$, 即$(x_i, x_j) \notin A_0 \cup A_f$时, 其编队控制转换为队形保持模式.

5 实验结果(Experiment results)

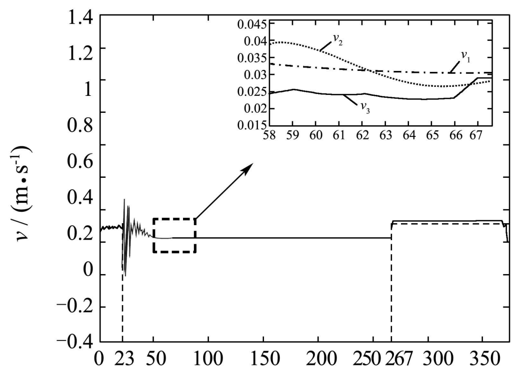
5.1 避障仿真实验结果(Simulation results of obstacle avoidance)

本节给出具有代表性的避障仿真实验来对本文所提的避障算法进行验证. 按照实际机器人性能指标, 每个机器人的最大线速度1 m/s, 驱动轮间距0.4 m, 控制周期1.5 s.

结合编队避障控制算法, 实验以3个移动机器人保持三角编队队形并通过一障碍区域. 领队机器人R_1与跟随机器人R_2和R_3之间的期望相对位姿参数分别为l =1.5 m, $\varphi_{12\mathrm{d}} = 0.6\pi$ rad和$l_{13\mathrm{d}}$=1.5 m, $\varphi_{13\mathrm{d}}$=1.2π rad; 机器人距离障碍物的最小极限距离$c_{\min}$=0.5 m, 进入避障区域的边界距离$c_{\max}$=2 m. 由实验结果图4(a)可知, 机器人R_1与R_2, R_3组成的三角编队整体能够在障碍区域内实现稳定避障操作, 最终到达编队目标点. 另外图4(b)给出了3个机器人在整个避障过程中的速度变化比较结果. 当$n = 23$时, 领队机器人R_1的线速度v_1降低到恒定避障速度, 而跟随机器人的线速度v_2和v_3受控制模式切换影响而发生短暂波动. 当$n = 267$时, R_1绕开障碍物, 其速度v_1恢复到原来速度大小, 而速度v_2在避障控制模式下为保持与领队机器人的距离而波动, 但在队形保持控制作用下, 很快稳定收敛于期望速度值. 可见编队控制模式在队形保持和障碍避免之间切换时, 受其他机器人速度突变和控制规则对初始条件要求影响, 其控制状态会出现短暂波动现象. 但在实际机器人平台上, 可以通过状态平滑措施解决控制模式切换的稳定性问题.



(a) 编队避障轨迹



(b) 机器人线速度变化

图 4 机器人三角编队避障

Fig. 4 Obstacle avoidance of triangular formation

5.2 列编队实际实验结果(Simulation results of obstacle avoidance)

实验中所使用的两台SmartRob2机器人是自主智能移动机器人平台. 该平台配备有激光、视觉、碰撞以及里程计等多种传感器, 并且可以通过基于IEEE802.11协议的无线网卡与局域网中的计算机进行通信. 在编队任务中, 基于激光测距系统来检测机器人相对位姿, 基于摄像机颜色识别系统来识别机器人身份和机器人前端方向. 在存在干扰和遮挡情况时则利用里程计来校正实验数据, 并以通信形式传递编队机器人的速度信息. 上述高精度的外部传感器和无线网络通信设备为编队任务提供了实现提供了可靠的保证.

在室内编队实验中, 为准确获得跟随机器人R_2到领队机器人R_1的相对距离ρ和相对角度γ, R_2首先用激光测距系统(见图5)滤除实验场地的远端和近端噪声干扰, 并在领队机器人R_1上放置一目标圆柱体作为其位置标识, 其圆心位于编队控制点上. 本实验采用两个LMS200型号的激光测距仪构成测距系统, 其角度分辨率取为0.5°. 圆柱体半径大小为r, 当测距系统检测到目标圆柱体上的边界点距离为$l_{\rm b}$时, 则其有效检测数据点的个数必然满足$n = 4\arctan(r/l_{\rm b})$. 因此$n$的大小与激光测距系统到目标圆柱体的距离成反比例关系. 本实验系统中, 圆柱体半径r为0.06 m, 因此编队机器人之间的最大有效期望距离为6.8 m, 这样通过任意两个有效数据点可以计算得到机器人之间的相对距离ρ 和相对角度γ值.

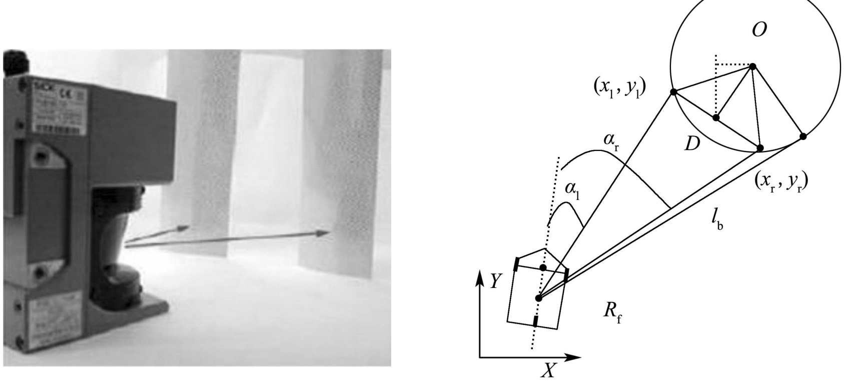


图 5 LMS200型激光测距仪和相对位姿检测系统示意图

Fig. 5 LMS200 laser range-finder and the abstractive view of relative position detection

图5中的$(x_{\rm l}, y_{\rm l})$和$(x_{\rm r}, y_{\rm r})$为目标圆柱体上任意两个有效数据点的坐标值, $\alpha_{\rm l}$和$\alpha_{\rm r}$为跟随机器人方向到这两个检测数据点的角度大小, 则目标圆柱体的圆心坐标满足方程

$$\begin{cases} x_c = \dfrac{1}{2}(x_{\rm l}+x_{\rm r})+\sqrt{r^2-\dfrac{1}{4}[(x_{\rm l}-x_{\rm r})^2+(y_{\rm l}-y_{\rm r})^2]}\cdot \\ \qquad \cos(-\arctan^{-1}(\dfrac{y_{\rm l}-y_{\rm r}}{x_{\rm l}-x_{\rm r}})), \\ y_c = \dfrac{1}{2}(y_{\rm l}+y_{\rm r})+\sqrt{r^2-\dfrac{1}{4}[(x_{\rm l}-x_{\rm r})^2+(y_{\rm l}-y_{\rm r})^2]}\cdot \\ \qquad \sin(-\arctan^{-1}(\dfrac{y_{\rm l}-y_{\rm r}}{x_{\rm l}-x_{\rm r}})). \end{cases} \tag{25}$$

其中(x_c, y_c)是在激光坐标系下的机器人R_1 坐标值. 通过简单坐标变换把(x_c, y_c)转换到跟随机器人控制点为原点的极坐标系下, 即得到跟随机器人到领队机器人的相对位姿信息.

图6为基于上述实验平台, 应用本文提出的复合编队控制方法实现往返行为编队任务的实验系统和实验结果. 机器人之间以SOAP(simple object access protocol)消息包的形式实时传送速度信息, 并且其线速度v和角速度ω同时满足于本文定义的变量约束区域D, 控制参数$l_{\rm d}$ =0.8 m, $\varphi_{\rm d}$=0.01π rad, d_1=0.15 m, d_2=0.1 m, α=0.396 m, T=1.5 s. 领队机器人R_1以速度0.1 m/s做往返运动, 其速度分别在t =16.5 s和t =24 s时刻发生启停变化. 实验结果图6(a)为R_1位置y_1和跟随机器人R_2的位置y_2, 在队形保持运动过程中, 各个周期检测得到目标圆柱体上数据点个数为16个左右, 其变化曲线见图6(b). 在复合编队控制算法作用下, 跟随机器人R_2 的速度调整(见图6(c))使两个机器人之间的相对距离l始终趋向于期望值0.8(见图6(d)). 图5所示的实验结果验证了编队控制算法在往返运动中的有效性, 然而领队机器人速度突变会导致跟随机器人控制滞后现象, 这是由编队系统的分布式控制特性引起的. 实际应用中可通过状态预测来有效降低编队误差.

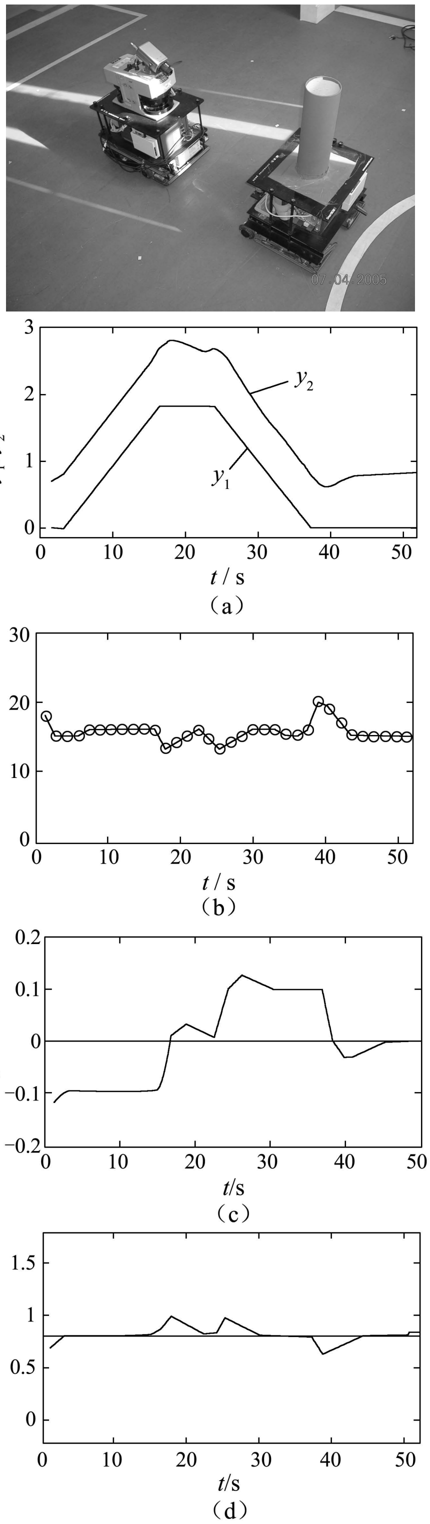


图6 机器人往返运动编队控制

Fig. 6 Shuttle-movement formation control of two robots

6 结论(Conclusion)

本文研究了非完整自主机器人的非刚性编队控制问题. 本文的主要贡献在于: 基于机器人的非完整特性对运动约束区域进行划分, 并据此提出具有双向跟随特性的反馈线性化控制算法和最优近似目标算法. 与传统的编队控制方法相比, 两种算法相结合构成的复合控制方法增强了编队控制的灵活性和稳定性, 对解决复杂环境下的多机器人巡逻、环境探测等任务提供了有效的方法. 如何将编队复合控制方法扩展应用到任意多个智能移动机器人的协作任务中是下一步研究工作的重点.

参考文献(References):

[1] ZHIYUN L, FRANCIS B, MAGGIORE M. Necessary and sufficient graphical conditions for formation control of unicycles[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2005, 50(1): 121 – 127.

[2] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926 – 939.

[3] NAFFIN D J, SUKHATME G S. Negotiated Formations[C] // *Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Autonomous Systems*. Amsterdum Netherlands: [s.n.], 2004: 181 – 191.

[4] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387 – 403.

[5] WEI R,BEARD R W A. Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach[C] // *Proc of 2003 American Control Conference*. Denver, Colorado, USA: [s.n.], 2003, 2(1): 1746 – 1751.

[6] 席裕庚, 陈卫东, 董胜龙. 移动机器人的时间最优编队[J]. 控制与决策. 2001, 16(5): 573 – 576.
(XI Yugeng, CHEN Weidong, DONG Shenglong. Time-optimal formation for mobile robots[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 573 – 576.)

[7] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2001, 17(6): 905 – 908.

[8] XINGPING C,SERRANI A,OZBAY H. Control of leader-follower formations of terrestrial UAVs[C]// *Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control*. Mavi, Hawii, USA: [s.n.], 2003, 1(1): 498 – 503.

[9] DESAI J, OSTROWSKI J, KUMARV. Controlling formations of multiple mobile robots[C]// *Proc of IEEE Int Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: [s.n.], 1998, 4(1): 2864 – 2869.

[10] COWAN N, SHAKERINA O, VIDAL R. Vision-based follow-the-leader[C]// *Proc of IEEE/RSJ Int Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2003, 2(1): 1796 – 1801.

[11] 郭丙华, 胡跃明. 考虑动力学模型的非完整移动机器人运动规划[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 443 – 446.
(GUO Binghua, HU Yueming. Motion planning for nonholonomic robot with dynamic modeling[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 443 – 446.)

[12] BARFOOT T D, CLARK C M. Motion planning for formations of mobile robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2004, 46(2): 65 – 78.

作者简介:

陈余庆 (1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多智能机器人协作与监控, E-mail: cyqb@163.com;

庄 严 (1975—), 男, 博士, 讲师, 研究研究领域为移动机器人地图创建、定位与导航, E-mail: aaronzhuang@163.com;

王 伟 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究兴趣有模型预测控制和机器人控制技术, E-mail: wangwei@dlut.edu.cn.