文章编号：1000-8152(2004)05-0757-08

基于人工协调场的多移动机器人实时协调避碰规划

景兴建[1,2]，王越超[1]，谈大龙[1]
(1.中科院沈阳自动化所 机器人学实验室,辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院研究生院,北京 100080)

摘要：为克服传统人工势场在动态未知环境下机器人避碰规划中存在的缺陷,提出人工协调场法(ACF).将场函数与机器人的风险状态相结合,给出并讨论了人工协调场的基本设计.基于人工协调场,考虑机器人的运动约束,实现了多机器人之间以及机器人与环境间的实时协调避碰,提出了一个多移动机器人无死锁实时避碰规划算法.理论分析和仿真试验证明所提方法的有效性.

关键词：人工协调场；动态不确定环境；协调避碰；多机器人
中图分类号：TP18,TP24　　**文献标识码**：A

Artificial coordinating field based real-time coordinating collision-avoidance planning for multiple mobile robots

JING Xing-jian[1,2]; WANG Yue-chao[1]; TAN Da-long[1]
(1.Robotics Laboratory,Shenyang Institute of Automation,Chinese Academy of Sciences,Shenyang Liaoning 110016,China;
2.The Graduate School,Chinese Academy of Sciences.Beijing 100080,China)

Abstract: To overcome the drawbacks of the conventional artificial potential fields in motion planning of mobile robots for dynamic uncertain environments,an artificial coordinating field (ACF) is proposed.Definitions and basic designs of the ACFs were investigated with regard to the collision risk and motion constraints of mobile robots.Based on the ACFs,an effective algorithm without the "dead-lock" for coordinating collision avoidance of multiple mobile robots in dynamic uncertain environments was developed.The theorical analysis and simulations illustrated our results.

Key words: artificial coordinating fields; dynamic uncertain environments; coordinating collision avoidance; multiple mobile robots

1 引言(Introduction)

动态未知环境下移动机器人运动规划是一个NP-hard问题[1,2],它要求机器人在局部有限的环境信息下,实时决策出期望的能够满足运动约束和运动要求的运动行为,避碰是其中行为决策的一个重要的基本要求.近些年来,有不少方法解决这一问题,如增加时间维的C-空间法[3],智能学习算法[4],基于行为的方法[5],速度障碍物法[6],碰撞扇法[7]等.其中,人工势场法[8,9],由于其算法简单、安全性高而一直得到广泛的研究和应用.但传统人工势场法却存在着抖动和局部极小等问题[9].为克服这些不足也有不少方法被提出[8,10],但这些方法大都不能完全适应动态未知环境下的实时避碰规划要求,要么需要知道一定的全局环境信息,要么仅处理静态环境,而且一般没考虑实际机器人的运动约束.为此作者提出人工协调场的方法[11],即在传统排斥力场中增加一个协调力,并将吸引力、排斥力和协调力与局部环境下机器人的运动状态和运动要求结合起来.仅利用局部环境信息,它可以有效地保证机器人的安全性,并能克服传统人工势场所存在的局部极小等问题,提高机器人在复杂动态环境下行为决策的准确性和鲁棒性,本文给出协调场参数的基本设计.在现有的方法中,大多是将障碍物看作是非智能型的静态或动态障碍物来处理,即障碍物不具有躲避能力,而实际上在很多情况下如多机器人环境,还存在一个多智能体的避碰协调问题.因此,本文研究如何基于人工协调场,在动态未知环境下实现多移动机器人的协调避碰.即要求机器人之间能在不与环境障碍物相碰的情况下协调运动,以最佳的方式相互躲避,并考虑机器人运动约束.理论分析和仿真

收稿日期:2003-04-22;收修改稿日期:2004-02-02.
基金项目:国家自然基金项目(60131160741,60334010).

结果证明了所提方法的有效性.

2 人工协调场(ACF)的定义及参数设计(Definition and design of the Artificial Coordinating Fields)

假定移动机器人在二维平面 U 内运动,$U = \{(x,y)^{\mathrm{T}} \mid x,y \in \mathbb{R}\}$,其中点 $q = (x,y)^{\mathrm{T}}$ 为列向量形式,$\mathbb{R}$ 代表全体实数集,∂U 表示 U 的边界. 用 $e(A)$ 表示矢量 A 的单位矢量,用 $\mathbb{R}^2$ 表示全体二维矢量集.两有序点之差表示一个矢量,$[*]^{\mathrm{T}}$ 表示向量转置.其它相关符号说明见附录.

2.1 定义(Definitions)

定义 1 设点集 $D \subset U$ 是一个凸集合.对于 $\forall q \in U, q \notin D$,有映射 $\boldsymbol{g}_D: q \to \partial D$ 使得 $p = \boldsymbol{g}_D(q) = \arg\min_{p \in \partial D} \| q - p \|$. 定义 $\boldsymbol{F}: q \to \mathbb{R}^2$, 其中 $|\cos(\angle(e(\boldsymbol{F}(q)), q - \boldsymbol{g}_D(q)))| = 1$, $\angle(*,*)$ 表示两矢量的夹角,则函数 $\boldsymbol{F}(q)$ 定义了一个围绕 ∂D 的力矢量场, 记为 $\boldsymbol{F}(q)_D$, 如果 $\cos(\angle(e(F(q)), q - p)) = 1$,则矢量方向向外为一排斥力场记为 $\boldsymbol{F}_r(q)_D$,反之为吸引力场记为 $\boldsymbol{F}_a(q)_D$.

D 外点 q 的场方向在 p,q 的连线上,p 和 q 之间的距离,即称为点 q 到障碍物 D 的距离.两封闭区域 O_1 和 O_2 的距离,定义为其边界间最小距离,记为 $d(O_1, O_2)$. 定义 1 从力矢量场的角度定义了传统人工势场的情况,即排斥力或吸引力在机器人和距障碍物边界最近点或目标点的连线上.

定义 2 设 $\boldsymbol{F}_r(q)_D$ 为 U 内一个围绕区域 D 的排斥力矢量场(见定义 1),对于 $\forall q \in U, q \notin D$,定义映射 $\boldsymbol{F}_n: q \to \mathbb{R}^2$,有 $\boldsymbol{F}_n(q) = \lambda \cdot \| \boldsymbol{F}_n(q) \| \cdot e(\boldsymbol{T} \cdot (q - \boldsymbol{g}_D(q)))$,称矢量 $\boldsymbol{F}_n(q)$ 为协调力矢量,其中 $\lambda \in \{1, 0, -1\}$ 称为协调因子,$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$,即矢量 $\boldsymbol{F}_n(q)$ 垂直 $\boldsymbol{F}_r(q)_D$. 把具有协调力矢量的排斥力矢量场称为人工排斥协调力矢量场,简称排斥协调场.

协调力矢量和排斥力矢量垂直,如果取 $\lambda = 0$ 则相当于传统人工势场的情况,因此传统人工势场仅是人工协调场的一个特例.人工协调场具有二维正交力分量.

定义 3 设 $\boldsymbol{F}(q)_i$ 是 U 内障碍物 O_i 周围的排斥协调场(见定义 2),如果存在边界 $\partial \boldsymbol{F}_i$,对于任意 $\partial \boldsymbol{F}_i$ 所包含区域外一点 q,有 $\boldsymbol{F}(q)_i = 0$,称 $\boldsymbol{F}(q)_i$ 为人工有界力矢量场,简称有界矢量场.在边界上排斥力强度定义为 $\| \boldsymbol{F}_{ri} \| \geqslant M_O \geqslant 0$,且有 $\forall q \in \partial F_i$, $\| q - \boldsymbol{g}_i(q) \| \leqslant R$,$R$ 为机器人传感器的有效感测距离.∂F_i 所包含区域记为 Γ_i.

定义 3 说明障碍物只有在进入机器人的有效感测范围(称为可视域)之内才存在场的作用,满足机器人在全局未知的环境下运动规划的要求.场边界处的强度 M_O,其值将在引理 1 中说明.同时存在一个引力场和有界排斥协调场的情况见图 1.在协调力的作用下,排斥协调场的力矢量将会发生有目的的弯曲,这使得机器人在遇到障碍物时可以通过适当决策协调因子进行有效的运动协调.

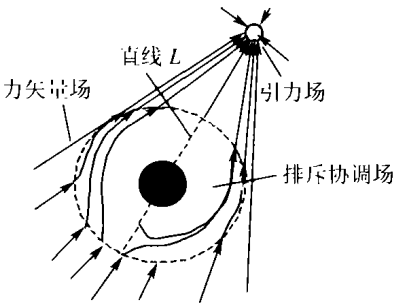


图 1 引力场和排斥协调场叠加(直线 L 左侧取 $\lambda = -1$,其它取 $\lambda = 1$)

Fig. 1 Attractive field and a repulsive field (on the left of the line L $\lambda = -1$, otherwise $\lambda = 1$)

2.2 协调场参数基本设计(Fundamental designs of ACF)

本节按照定义 1~3 给出协调场参数的基本设计.在机器人目标点 q_d 处定义引力场基本形式

$$\begin{aligned} &\forall q \in U / q_d, \\ &\boldsymbol{F}_a(q)_{q_d} = K_a(q_d - q). \end{aligned} \tag{1a}$$

对于任意障碍物 O_i 处的排斥协调场定义其相应排斥力和协调力的基本形式如下:

$$\begin{cases} \forall q \in \Gamma_i / i, \\ \boldsymbol{F}_r(q)_i = K_{ri}(q - \boldsymbol{g}_i(q)), \\ \boldsymbol{F}_n(q)_i = K_{ni} \cdot \lambda \cdot \boldsymbol{T} \cdot (q - \boldsymbol{g}_i(q)). \end{cases} \tag{1b}$$

其中,K_a, K_{ri}, K_{ni} 称为场强参数,$\lambda, \boldsymbol{T}$ 同上.

将机器人看作质量为 M 半径为 r 的圆形质点,记 t 时刻所占区域为 $\mathrm{Rob}(q_r, t)$,机器人中心点位置 $q_r = (x,y)^{\mathrm{T}}$,速度矢量为 $\dot{q}_r = \boldsymbol{V}_r$,其可视域内所感测到的静态和动态障碍物分别用集合 O_{s} 和 O_{d} 来表示,$V_{\max}$ 和 $a_{\max}$ 分别表示其最大速度和加速度.并假定在 $t = t_0$ 时,$d(\mathrm{Rob}, O) > 0 (\forall 0)$. 在协调场下其动力学方程为

$$\begin{aligned} M\ddot{q}_r = &- K_f(\dot{q}_r - \dot{q}_d) + \boldsymbol{F}_a(q_r)_{q_d} + \\ &\sum_{i \in O_{\mathrm{d}} \cup O_{\mathrm{s}}} \boldsymbol{F}_r(q_r)_i + \sum_{i \in O_{\mathrm{d}} \cup O_{\mathrm{s}}} \boldsymbol{F}_n(q_r)_i. \end{aligned} \tag{2}$$

$K_f > 0$, $\dot{q}_d$ 表示期望速度,该方程称为规划方程.

2.2.1 风险预测(Risk evaluation)

碰撞风险越大,场的作用就当越强.沿障碍物边缘向外增加厚度 r,新边界称为膨胀曲线.

命题 1 假定 t 时机器人与障碍物 O_i(速度为 $\boldsymbol{V}_o$)相遇,记 $\theta = \angle(\boldsymbol{V}_r, \boldsymbol{V}_o)$.从点 q_r 做膨胀曲线的切线,切点分别为 a, b. 记

$$\boldsymbol{V}_{or} = \boldsymbol{V}_r - \boldsymbol{V}_o,$$

$$\theta_{r1} = \angle(\boldsymbol{V}_{or}, (e(a - q_r) + e(b - q_r))/2),$$

$$\theta_{r2} = \angle(e(a - q_r), e(b - q_r))/2.$$

如果 $\theta_{r1} \leqslant \theta_{r2}$,且 $\boldsymbol{V}_{or}$ 或 $\boldsymbol{V}_r$ 和 $\boldsymbol{V}_o$ 保持不变,则必碰撞.

证 由题设相对膨胀后的障碍物,机器人可看作一点(见图 2),假定机器人速度为 $\boldsymbol{V}_{or}$,则障碍物可看作静止,矢量$(e(a - q_r) + e(b - q_r))/2$是切线矢量 $e(a - q_r)$ 和 $e(b - q_r)$ 的角平分线,θ_{r1} 是 $\boldsymbol{V}_{or}$ 与此角平分线的夹角,而 θ_{r2} 是矢量 $e(a - q_r)$ 和 $e(b - q_r)$ 夹角的一半.如 t 时有 $\theta_{r1} \leqslant \theta_{r2}$,则机器人的当前运动趋向必通过障碍物区域 $O_t(t)$,故若保持当前相对速度 $\boldsymbol{V}_{or}$,则必碰撞.　　证毕.

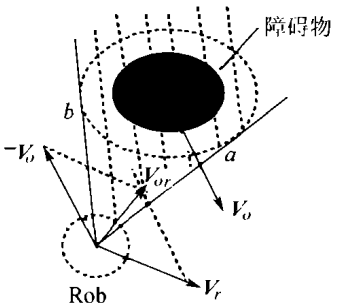


图 2　机器人与动态障碍物相遇

Fig. 2　Robot meets a moving obstable

不等式 $\theta_{r1} \leqslant \theta_{r2}$ 的逻辑值记为 risk-V_i(速度风险),如其成立则取值 1 即意味碰撞,否则取 0.障碍物对机器人构成的碰撞风险与相对距离和相对速度都相关,为此对障碍物 O_i 可定义绝对风险度:

$$\begin{aligned}\text{risk}_i = {} & k\text{-risk}_1/(\| q_r - g(q_r)_i \| + 0.01) + \\ & k\text{-risk}_2 \cdot \text{risk-}V_i \cdot ((\theta_{r2} - \theta_{r1})/\sup(\theta_{r2}) + \\ & \| \boldsymbol{V}_{or} \| / \sup(\| \boldsymbol{V}_{or} \|)).\end{aligned}$$

其中,$0 < k\text{-risk}_1, k\text{-risk}_2 < 1$.则机器人所受总风险度为 $\text{risk} = \sum_{i \in O_d \cup O_s} \mu_i \cdot \text{risk}_i$,对于 μ_i 有

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{if } i \in O_{d_I}, \\ 1.5, & \text{if } i \in O_s, \\ 2, & \text{if } i \in O_{d_UI} \end{cases}$$

其中 O_{d_I} 表示智能型动态障碍物,O_{d_UI} 表示非智能型动态障碍物.与绝对风险度相对应,定义相对风险度为

$$\text{risk-}r_i = (\mu_i \cdot \text{risk}_i)/\text{risk},$$

即对各障碍物的风险度归一化.

2.2.2 场强参数设计(Designs of the ACF)

现考虑风险预测,对式(1)中的几个待定场强参数 K_a, K_{ri}, K_{ni} 定义如下:

1) 在 risk 较大时,期望吸引力有所增强,以强化向目标点运动,但吸引力过大不利于安全性,故设计引力场强参数为

$$K_a = k_a(1 + \min(K_{a_c}, \text{risk})). \tag{3}$$

其中 $k_a > 0$, $K_{a_c > 0}$ 为常数.

2) 对于排斥力,在障碍物 i 对机器人没有碰撞威胁时,排斥力是不必要的,故令

$$K_{ri} = k_r \cdot (\text{risk-}r_i + \varepsilon_1) \cdot k_{ri} / \| q - \boldsymbol{g}_i(q) \|. \tag{4}$$

$$k_{ri} = \frac{1}{(\text{pos}(\| q - \boldsymbol{g}_i(q) \| - r - (\text{pos}(\boldsymbol{V}_{or} \cdot e(\boldsymbol{g}_i(q) - q)))^2 / 2a_{\max}))^n},$$

$n \geqslant 1$, $\text{pos}(x) = \max(0, x)$, $k_1 > 0$, $0 \leqslant \varepsilon_1 < 1$, ε_1 表示在无风险时场的剩余强度.

3) 对于协调力参数 K_{ni},为保证其有效性,应与排斥力强度具有同样数量级,并假定协调力强度有上界.为此令

$$K_{ni} = \min(K_n\text{-max}, k_n \cdot (\text{risk-}r_i + \varepsilon_2) \cdot k_{ni} / \| q - \boldsymbol{g}_i(q) \|). \tag{5}$$

$$k_{ni} = \frac{1}{(\text{pos}(\| q - \boldsymbol{g}_i(q) \| - r - (\text{pos}(\boldsymbol{V}_{or} \cdot e(\boldsymbol{g}_i(q) - q)))^2 / 2a_{\max}))^m},$$

其中 $m > 0$, $k_n > 0$, $K_n\text{-max}$ 为协调力上界,假定 $K_n\text{-max} \gg \sup(\| F_a \|)$, ε_2 意义同 ε_1.

注 1 记 $v = \boldsymbol{V}_{or} \cdot e(\boldsymbol{g}_i(q) - q)$,它就是机器人朝向障碍物 O_t 最近点运动的相对速度大小.如果 $v \leqslant 0$,则必可保证安全性.否则在机器人运动到距 $\boldsymbol{g}_i(q)$ 点 $r + v^2/2a_{\max}$ 远时,只要以 $a_{\max}$ 的加速度减速运动,也可保证安全性.由式(4)在此处有 $F_{ri} \cdot e(\boldsymbol{g}_i(q) - q) \to -\infty$,故可保证安全性.

注 2 从排斥力和协调力强度的定义式(4),(5)来看,两者与绝对风险度成正比,而与总风险度成反比.如两机器人相遇,其相互作用力可能是不对称的,总风险度小的机器人受到的来自总风险度大的机器人的作用力要大,反之则小,因两者给对方产生的绝对风险度是一样的,这样总风险度大则相对风险度小.这将有利于风险度大的机器人从复杂危险环境中尽快的脱离出来.

注 3 在传统人工势场内,局部极小发生在排斥力和吸引力的平衡点处,当机器人要通过两个障碍物间的狭缝或经过障碍物背向目标点一侧时,排斥力容易和吸引力达到平衡而使机器人无法继续运动.在协调场内,协调力可以用来增加机器人前进方向上的驱动力,有利于消除局部极小.对于单个障碍物,由于协调力的存在,局部极小点将不复存在(见图1).为克服障碍物间的极值点,可设计协调力保证在一定条件下机器人能够从任意两个障碍物间具有不小于2r宽度的狭缝通过.有如下结论.

命题 2 假定两障碍物 O_i, O_j 的最短间距为 $2a, a \geqslant r$.忽略引力作用,机器人通过障碍物 O_i, O_j 之间狭缝的充分条件是

$$\lambda_l = \arg \min_{\lambda \in \{1,-1\}} (\angle(\lambda \cdot \boldsymbol{T} \cdot (\boldsymbol{g}_i(q) - q), (e(\boldsymbol{g}_i(q) - q) + e(\boldsymbol{g}_j(q) - q))/2)),$$

$$l \in \{i, j\},\ m = n,\ k_n \geqslant kr\sqrt{(R/r+1)^2 - 1}.$$

证 求证协调力合力不小于排斥力合力即可,在三角形 $(q_r, \boldsymbol{g}_i(q_r), \boldsymbol{g}_j(q_r))$ 内利用余弦定理,不难证明此结论.证略.

2.2.3 基于协调因子 λ 的行为决策(λ based behavior decision)

在协调场内可通过对定义2中的协调因子 λ 的实时决策,借助协调力的作用来改变机器人在遇到障碍物时的运动方向,实现最佳的避碰行为.基于 λ 的实时行为决策可表示为 $\lambda = \arg_{\lambda \in \{1,0,-1\}}(J(\lambda))$,其中 $J(\lambda)$ 为评价指标.

做如下标记:机器人的可视域记为 $P(q_r, t)$,可视域内障碍物 O 所覆盖或被遮挡而不能检测到的区域为遮挡域 $P_u(t)_O$.假定如两障碍物间距不大于 $2r$,则视为同一障碍物.可视域内探测到的障碍物,除去障碍物的遮挡域所包含区域称为可视可行域,记为 $P_f(q_r, t)$,显然有

$$P_f(q_r, t) = P(q_r, t) - \bigcup_{i \in O_s \cup O_d} (P(q_r, t) \cap P_u(t)_i).$$

另外,用 $\boldsymbol{e}_{ds}$ 表示局部子目标点,即机器人在可视可行域内的局部运动方向.

对于环境非智能型障碍物采用如下子目标决策算法:

If $\|\boldsymbol{V}_0\| \leqslant V_0$, if 首次相遇且 $\exists p_{\text{sub}} = \arg \min_{p \in \partial P_f(q_r,t) \cap \partial P(q_r,t)} (\|p - q_d\|)$,称为子目标点,then 记 $\boldsymbol{e}_{ds} = e(p_{\text{sub}} - q_r)$, else $\boldsymbol{e}_{ds} = e(\boldsymbol{F}_a) + \kappa e(\boldsymbol{V})$. $\boldsymbol{V}$ 为机器人当前速度矢量,$\boldsymbol{V}_0$ 为一常量,$\kappa > 0$.

$$\text{else } \boldsymbol{e}_{ds} = -e(\boldsymbol{V}_0) + \kappa e(\boldsymbol{V}). \tag{6}$$

上述算法决策过程统称为决策式(6).

由此,对协调因子的最优决策为

$$\lambda = \arg(\angle_{\lambda \in \{1,-1\}} (\lambda \cdot \boldsymbol{T} \cdot (\boldsymbol{g}_0(q_r) - q_r), \boldsymbol{e}_{ds}) \leqslant \pi/2). \tag{7}$$

其中 p_{sub} 的选取要求机器人在遇到障碍物时首先应将子目标设定在可行域内距目标点最近的位置上.从式(6)看,子目标的决策依赖于吸引力的方向、机器人的当前速度以及障碍物的速度.如障碍物的速度小于一定的值 $\boldsymbol{V}_o$,协调力的方向选取与子目标夹角小于90°的方向,期望以最短路径超越过它.对于快速运动障碍物,则期望机器人尽快脱离障碍物的运动轨道.

3 多机器人协调避碰(Coordinating collision-avoidance of multi-robots)

现讨论基于 λ 的多机器人协调运动.避碰死锁,本文是指两机器人相遇后,一直或反复地处于躲避对方的状态,而最终导致其各自的目标点不可达.在多机器人之间,由于具有相同的智能控制算法,因而会导致避碰死锁问题,但又可通过一定的协调机制,实现有目的的行为协调,从而为避碰提供便利.本文的协调避碰机制就是要求机器人之间在不需要通信的情况下,通过充分利用人工协调场的特点,能够协调自己的运动,从而更好地实现相互之间以及与环境之间的避碰.当一个机器人处于风险度较大的环境时,通过这种协调避碰机制能够将自己的风险直接或间接地传递出去,使与它相邻的机器人协调其运动,从而使风险度大的机器人尽快脱离危险.由注2知,在协调场下本文采用人工场场强与机器人相对风险度线性相关的办法,为实现这种协调避碰的思想提供了基础.下面讨论如何决策 λ 来实现多机器人之间的无死锁最佳协调避碰行为.

考虑两机器人 i 和 j.定义混合运动状态为 $q_{-ij} = (q_i, \dot{q}_i, q_j, \dot{q}_j)^{\mathrm{T}}$;定义绝对安全状态为 $S_{q_ij} = \{q_{-ij} \mid \text{risk-}V_i = \text{risk-}V_j = 0\}$,显然如一直有 $q_{_ij} \in S_{q_ij}$,则两机器人之间必是安全的.但它不能保证无避碰死锁,为此定义无死锁安全状态:

$$S_{q_ij_I} = S_{q_ij} \cap \left\{ q_{-ij} \middle| \begin{array}{l} (\angle(e(q_{id} - q_i), e(q_j - q_i)) > \pi/2) \\ (\angle(e(q_{jd} - q_j), e(q_i - q_j)) > \pi/2) \end{array} \right\}.$$

q_{id} 和 q_{jd} 分别为机器人 i 和 j 的目标点.下面分析一

旦机器人进入 $S_{q_ij_I}$,就不会发生避碰死锁.将机器人 i 和 j 之间的作用力和受到的引力称为内力,其它的力称为外力.

引理 1　假定不存在外力作用,对于机器人 i 和 j,如存在 $T(>0)$ 当 $t>T$ 时有 $q_{_ij}\in S_{q_ij_I}$,则不会出现避碰死锁.

证　$d(i,j)>R$,机器人互相感测不到,不存在作用力,因而不会出现避碰死锁.考虑机器人分别在对方协调场内的情况.此时规划方程为

$$M\ddot{q}_i+K_f\dot{q}_i=\boldsymbol{F}_a(q)_i+\boldsymbol{F}_r(q)_{ji}+\boldsymbol{F}_n(q)_{ji}=$$
$$[f_{rji}\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji}+\boldsymbol{F}_r(q)_{ji}]+[f_{nji}\cdot e(\boldsymbol{F}_{nji})+\boldsymbol{F}_n(q)_{ji}],$$
$$M\ddot{q}_j+K_f\dot{q}_j=\boldsymbol{F}_a(q)_j+\boldsymbol{F}_r(q)_{ij}+\boldsymbol{F}_n(q)_{ij}=$$
$$[f_{rij}\cdot e(F_{rij})+\boldsymbol{F}_r(q)_{ij}]+[f_{nij}\cdot e(\boldsymbol{F}_{nij})+\boldsymbol{F}_n(q)_{ij}].$$

$\boldsymbol{F}_a(q)_i$ 为机器人 i 受到的吸引力,简记 $\boldsymbol{F}_{ai}$,$\boldsymbol{F}_{r/n}(q)_{ji}$ 为机器人 i 受到的机器人 j 的排斥力/协调力,简记 $\boldsymbol{F}_{rji}$ 或 $\boldsymbol{F}_{nji}$,并记 $f_{rji}=\boldsymbol{F}_{ai}\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji})$,$f_{nji}=\boldsymbol{F}_{ai}\cdot e(\boldsymbol{F}_{nji})$,$\boldsymbol{F}_a(q)_i$,$\boldsymbol{F}_r(q)_{ij}$,$\boldsymbol{F}_n(q)_{ij}$,$f_{rij}$ 和 f_{nij} 有同样意义.因为有

$$\angle(e(q_{id}-q_i),e(q_j-q_i))>\pi/2,$$
$$\angle(e(q_{jd}-q_j),e(q_i-q_j))>\pi/2,$$

则 $f_{rji},f_{rij}>0$,即两机器人所受吸引力在其所受排斥力方向上的力分量均为正.两规划方程相减得

$$M(\ddot{q}_i-\ddot{q}_j)+K_f(\dot{q}_i-\dot{q}_j)=$$
$$[(f_{rji}+f_{rij})\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji})+2\boldsymbol{F}_r(q)_{ji}]+$$
$$[(f_{nji}+f_{nij})\cdot e(\boldsymbol{F}_{nji})+2\boldsymbol{F}_n(q)_{ji}].$$

等式两边左乘 $(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}$,即得两机器人之间距离的动力学方程

$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}M(\ddot{q}_i-\ddot{q}_j)+(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}K_f(\dot{q}_i-\dot{q}_j)=$$
$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}[(f_{rji}+f_{rij}\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji})+2\boldsymbol{F}_r(q)_{ji}]+$$
$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}[(f_{nji}+f_{nij})\cdot e(\boldsymbol{F}_{nji})+2\boldsymbol{F}_n(q)_{ji}].$$

因 $(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}$ 与 $\boldsymbol{F}_{nji}$ 正交,等式右边第二项为 0:

$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}M(\ddot{q}_i-\ddot{q}_j)+(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}K_f(\dot{q}_i-\dot{q}_j)=$$
$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}[(f_{rji}+f_{rij})\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji})+2\boldsymbol{F}_{rji}].$$

注意 q_i-q_j,$\ddot{q}_i-\ddot{q}_j$ 和 $\boldsymbol{F}_{rji}$ 的方向是一致的,故

$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}M(\ddot{q}_i-\ddot{q}_j)\leqslant$$
$$\lambda_{\max}(M)\cdot(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}(\ddot{q}_i-\ddot{q}_j)\leqslant$$
$$\lambda_{\max}(M)\cdot(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}\cdot 2a_{\max}\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji}).$$

不失一般性取 $M=1$,得

$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}K_f(\dot{q}_i-\dot{q}_j)\geqslant$$
$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}[(f_{rji}+f_{rij})\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji})+2\boldsymbol{F}_{rji}]-$$
$$(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}\cdot 2a_{\max}\cdot e(\boldsymbol{F}_{rji}).$$

为使上式大于零只须 $\|\boldsymbol{F}_{rji}\|\geqslant a_{\max}$ 即可.为此可适当选取式(4)常量 k_r,使定义 3 中排斥力边界值满足 $M_O\geqslant a_{\max}$.选择能量函数 $G=(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}K_f(q_i-q_j)$,则有 $\dot{G}=2(q_i-q_j)^{\mathrm{T}}K_f(\dot{q}_i-\dot{q}_j)>0$,故两机器人间距将在排斥力和引力作用下增大直到脱离对方协调场,从而不会出现避碰死锁.　　证毕.

由引理 1,两机器人相遇时,如能决策 λ 使在协调场内有 $q_{_ij}\in S_{q_ij_I}$,则可避免避碰死锁的发生.考虑机器人 i 和 j,根据相遇时速度矢量的夹角,分三种情况进行讨论.

情况 1　$\angle(\dot{q}_i,\dot{q}_j)\neq 0,\pi$ 即两机器人交叉运动.记 $\boldsymbol{p}_{ij}=e(q_j-q_i)$,称其为相对位置矢量,记 $\boldsymbol{p}_1=(\dot{q}_i/\|\dot{q}\|_i+\dot{q}_j/\|\dot{q}_j\|)/2$,它是两机器人速度矢量的角平分线矢量.取 $\lambda_1=\arg(\underset{\lambda_1\in\{1,-1\}}{\angle}(\lambda_1\cdot\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{p}_1,\dot{q}_i)>\pi/2)$,记 $\boldsymbol{p}_{ij_d}=\lambda_1\cdot\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{p}_1$,称为期望相对位置矢量.应有 $S_{q_ij}\cap(p_{ij}=p_{ij_d})\subseteq S_{q_ij_I}$,故对于机器人 i 或 j 来说,只要通过运动协调将相对位置矢量转变为期望相对位置矢量即可.显然要使机器人以最短路径达到期望的相对位置矢量,需使两机器人以其连线中点为中心顺时针或逆时针转动,转动方向分别由相对位置矢量到期望位置矢量转动的最小转动角度来决定.即有

$$\lambda=\arg\min_{\lambda\in\{1,-1\}}(\angle(-\lambda\cdot\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{p}_{ji},\boldsymbol{p}_{ij_d})).\quad(8)$$

情况 2　$\angle(\dot{q}_i,\dot{q}_j)=\pi$,即两机器人反向平行运动.这时 $\boldsymbol{p}_1=0$,此种情况下对于机器人 i 定义其角平分线矢量为 $\boldsymbol{p}_{1i}=1\cdot T\cdot e(\dot{q}_i)$,则情况 1 的结果同样适用.并假定在决策式(8)中 λ 两种情况的角度如果相等则取 $\lambda=1$.且不难分析,在此种情况下得到的 λ 与情况 1 是一致的,即相对位置矢量以最小角度转动使 $q_{_ij}\in S_{q_ij_I}$.

情况 3　$\angle(\dot{q}_i,\dot{q}_j)=0$,即两机器人同向平行运动.此种情况在吸引力和排斥力的作用下,最终必可转化为情况 1 和情况 2,因此不需要协调力的作用,可令 $\lambda=0$.

机器人 i 在遇到智能型障碍物 j 时,将其上述协调因子的决策过程统称为式(8).相对位置矢量若满足无死锁安全状态,可设定此时的协调力足够小使得它对机器人的影响足够小.而相对矢量不满足无死锁安全状态且没达到期望相对矢量的情况,有结

论:

引理 2 假定无外力作用,机器人 i 和 j 在协调场内基于决策式(8),可将其相对位置矢量以最优方式转变为期望的相对位置矢量.

证 只要证明在未达到期望的相对位置矢量之前,协调因子的决策始终保持一致即可,因为只要两机器人能围绕着其连线中心一直同方向转动,就必可到达最终期望位置.

假定 t 时刻两机器人的速度矢量分别为 $\boldsymbol{V}_i$ 和 $\boldsymbol{V}_j$,相对位置矢量为 $\boldsymbol{p}_{ij}$(见图 3),不失一般性,假定 $\boldsymbol{V}_i$ 是固定的,矢量顺时针旋转得到的角度为正,反之为负,并假定此时相对位置矢量顺时针旋转,且有 $\boldsymbol{p}_{ij}$ 与 V_i 的夹角 $\angle(\boldsymbol{V}_i,\boldsymbol{p}_{ij}) = \theta_0 > 0$,则按照最优决策方程式(8),只要有 $\boldsymbol{V}_j$ 与 $\boldsymbol{V}_i$ 的夹角 $\angle(\boldsymbol{V}_i,\boldsymbol{V}_j) \in (0,\pi + 2\theta_0)$,则下一刻决策得到协调因子 λ 将是不变的.如没其它外力干扰,既然相对位置矢量顺时针旋转,则机器人 j 在 $e(1 \cdot \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{p}_{ij})$ 上必有速度分量,又考虑此时对机器人 j 的协调力应是 j 受到的各作用力中起主导作用的,因此可选取(5)式常量 k_n 足够大保证下一时刻机器人 j 在 $e(1 \cdot \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{p}_{ij})$ 上仍有速度分量,因此下一时刻应有 $\angle(\boldsymbol{V}_i,\boldsymbol{V}_j) \in (\theta_0,\pi + \theta_0)$,显然必有 $\angle(\boldsymbol{V}_i,\boldsymbol{V}_j) \in (0,\pi + 2\theta_0)$. 对于逆时针旋转的情况,可分析亦有同样结论. 证毕.

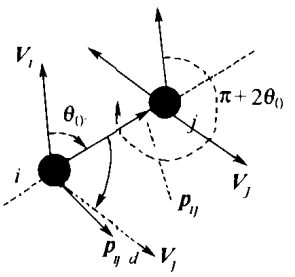


图 3 两机器人相遇

Fig. 3 Two robots meet with each other

定理 1 假定无其它外力干扰,则两机器人相遇,基于决策方程(8),必可以最优方式达到无死锁安全状态,不存在避碰死锁.

证 由引理 1 和引理 2,两机器人相遇,基于决策式(8),其相对位置矢量将以最小的转角旋转到期望的无死锁相对位置矢量上. 证毕.

4 基于 ACF 的多移动机器人避碰的仿真研究 (Simulations of ACF-based collision-avoidance of multi-robots)

规划结果要满足移动机器人的运动约束(如速度和加速度的饱和限制等),为此本文通过对规划方程的控制来检验上述所提方法的有效性.假定各机器人最终目标点已知,但环境障碍物只有在进入可视域内才能感测到,并能区分智能和非智能型障碍物,所有障碍物之间及障碍物和目标点之间不相交.将式(1)代入规划方程(2),并用 $[x,y]^{\mathrm{T}}$ 代替 q_r,并选取系统状态为 $X = [\dot{x},\dot{y},x,y]^{\mathrm{T}}$, 则有

$$M\dot{X} = A \cdot X + B \cdot u. \tag{9}$$

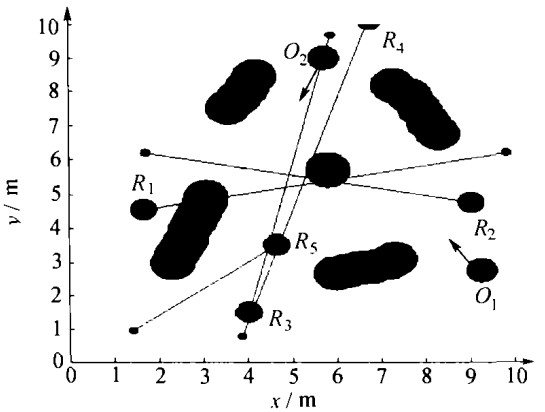
其中 A,B,u 见参考文献[11].仿真中,考虑实际移动机器人在速度和加速度方面的饱和限制.

仿真中,增加安全裕量 $d = 0.1$ m,机器人参数为:$r = 0.3$ m,$R = 1.5$ m,$a_{\max} = 0.5$ m/s^2,$V_{\max} = 0.5$ m/s. 根据大量仿真研究结果,场参数和控制参数可按如下选取:

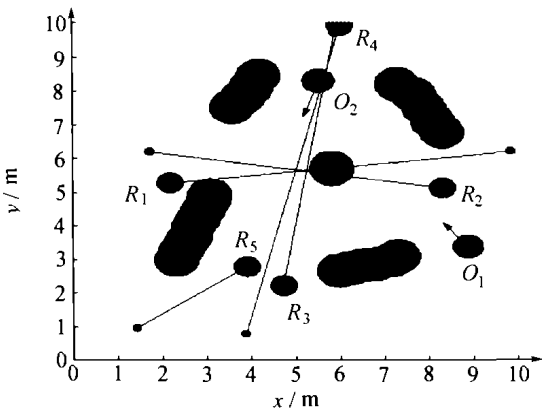
引力场参数(式(3)): $k_a = 1$,$K_{a_c} = 4$,要首先确定这两个参数的值;排斥力参数(式(4)):$n = 2$,$\varepsilon_1 = 0.05$,$k_r = 15$,场边界 $M_O = 1 > a_{\max}$(引理1),应使排斥力在安全距附近远远大于吸引力;协调力参数(式(5)):$\varepsilon_2 = 0.01$,$K_{n_\max} = 200$,$k_n = 6k_r$,$m = 2$ (命题 2),可据命题 2 选择协调力参数;风险预测参数:k-risk1 $= 0.1$,k-risk2 $= 0.9$,在其取值范围内可据不同目的调整其比重;协调因子决策参数(式(7)):$V_O = 0.2$ m/s,$\kappa = 2$;κ 越大则机器人当前速度对子目标的影响越大,但太大会使规划路径不必要地绕远.

假定动态障碍物的半径为 0.35 m,速度为 0.3 m/s,路径固定.仿真结果见图 4(a) ~ (e).图中,R_i 代表机器人 i,O_j 代表动态障碍物 j,其它为静态障碍物.在机器人的当前位置到其目标点有一条连线,用以表明机器人的期望前进方向.动态障碍物有箭头表示其运动方向.在(a),(b)两图中,机器人 R_3 和 R_5 相遇,它们以很自然的右转来躲避对方,显然以这种方式双方的运动路径都较短.图(c)中机器人 R_1 通过两静态障碍物形成的缝隙,而在传统人工势场中由于此处容易出现局部极小而使机器人不能前进.机器人在遇到动态障碍物时,由于协调力的存在,使得机器人的运动具有明显的有目的的躲避行为,从机器人 R_1 躲避障碍物 O_2 的过程即可看出.在图(c)中,如果没有存在协调力,则 O_2 会将机器人 R_1 向后推回,而实际上,从其运动路径看(图(e)),

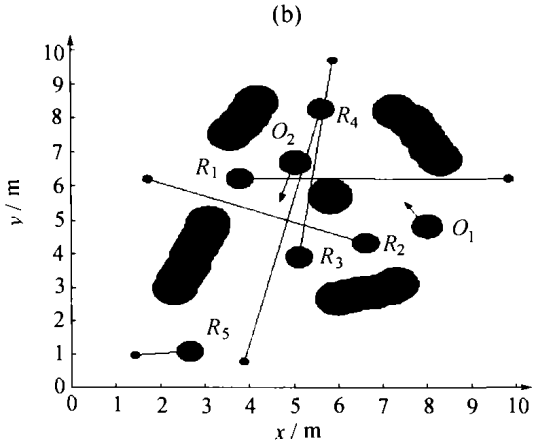
R_1 只是向左运动了一下,就将 O_2 躲避过去.其它图也都可以看出上述这种机器人和障碍物以及机器人和机器人之间的有目的且有效的躲避运动.



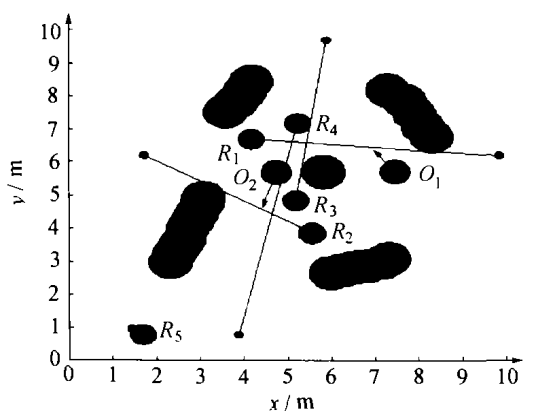
(a)



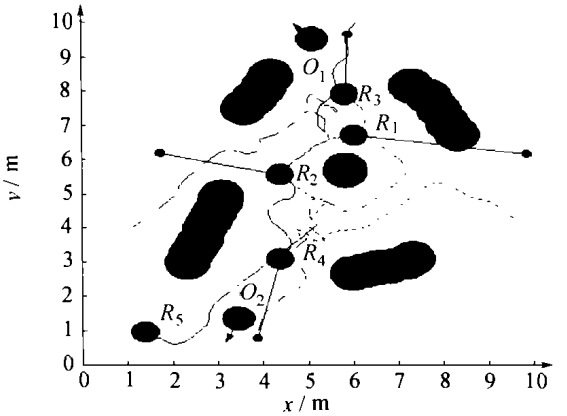
(b)



(c)



(d)



(e)

图 4　动态仿真结果

Fig. 4　Simulation results

5　结论(Conclusions)

本文提出了人工协调场的概念,在二维运动空间内它具有完备的正交力矢量,传统人工势场只是其一个特例.它可以克服传统人工势场的一些不足,增强机器人在复杂环境下行为决策的准确性和鲁棒性.在人工协调场的基础上,本文提出了复杂动态未知环境下多机器人协调避碰算法,从仿真实验和理论分析来看,该方法较好地实现了机器人与环境之间以及机器人与机器人之间的协调避碰运动.文章对多机器人之间的避碰死锁进行了分析,并从算法上给予了避免.在考虑机器人运动约束的基础上,通过规划方程来对机器人避碰运动行为进行分析和设计,提高了算法的可行性和有效性.

参考文献(References):

[1] CANNY J, REIF J. New lower bound technigues for robot motion planning problems [C]// *Proc of the 28th IEEE Symp on Found of Comp Sci*. Los Alamitos: International House, 1987:266 - 271.

[2] SANBOM J, HENDLER J. A model of reaction for planning in dynamic environments[J]. *Int J of Art Intell Eng*, 1988, 3(2):95 - 101.

[3] FUJIMURA K, SAMET H. A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles [J]. *IEEE Trans on Robot and Automat*, 1989, 5(1):61 - 69.

[4] ZALAMA E, GAUDIANO P, LOPEZ-CORONADO J. A real-time unsupervised neural network for the low level control of a mobile robot in a nonstationary environment [J]. *Neural Networks*, 1995, 8(2):103 - 123.

[5] LANGER D, ROSENBLATT J, HEBERT M. A behavior-based system for off-road navigation [J]. *IEEE Trans on Robot and Automat*, 1994, 10(4):776 - 783.

[6] FIORINI P, SHILLER Z. Motion Planning in dynamic environments using the relative paradigm [C]// *IEEE Int Conf of Automatic and*

Robotics. Los Alamitos: International House, 1993: 550 - 566.

[7] ANIMESH C, DEBASISH G. Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybenetics*. - Part A: Syst. and Humans, 1998, 28(5): 562 - 574.

[8] KROGH B. A generalized potential field approach to obstacle avoidance control [C] // *International Robotics Research Conference*. Bethcehem, PA: [s.n.] 1984: 950 - 955.

[9] KOREN Y, BORENSTEIN J. Potential field methods and their limitations for mobile robot navigation[C] // *Proc of IEEE Int Conf Robot. and Automat*. Sacramento, California: International House, 1991: 1398 - 1404.

[10] SATOH K. Deadlock-free motion planning using the Laplace potential field [J]. *Adv Robotics*, 1993, 7(5): 449 - 461.

[11] JING Xingjian, WANG Yuechao. Artificial coordinating field based coordinating collision avoidance [C] // *Proc of IEEE Conf on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*. Changsha, China: International House, 2003: 126 - 130.

附录(Appendix):

个别符号说明.

q_r 表示机器人其中心点坐标, q_d 表示其目标点(如加下标 i 用于区别不同机器人); O 或 O_i 表示障碍物,用下标 i 或 j 来区别不同障碍物; ∂D 表示点集 D 的边界;黑体表示一个矢量或矩阵,否则为一标量或函数(文中的 p, q 和 q_r 一般均表示一点,虽是二维向量,但为方便没用黑体表示); $\boldsymbol{F}_s(q)_i$ 表示二维力矢量场函数(或简记为 $\boldsymbol{F}_{si}$),而 K_{si} 和 k_{si} 表示其场参数,其中下标 $s = r$ 和 n 分别表示排斥力和协调力, i 表示障碍物 O_i 或 i 所形成的场, $\boldsymbol{F}_a(q)_i$ 表示第 i 个机器人所受的目标点 q_{di} 处引力场的吸引力矢量, K_{ai} 表示其场参数; $d(O_1, O_2)$ 表示两封闭区域 O_1 和 O_2 边界的最小距离; $\boldsymbol{g}_O(q)$ 表示封闭区域 O 边界上距点 q 距离最近的点.

作者简介:

景兴建 (1976 —),男,中国科学院沈阳自动化所机器人学实验室博士生,研究兴趣为鲁棒控制、多机器人协调控制、智能计算方法, E-mail: xjjing@ms.sia.ac.cn, jingxingjian@163.com;

王越超 (1960 —),男,研究员,博士生导师,中国科学院沈阳自动化所所长,研究兴趣为机器人学, E-mail: ycwang@sia.ac.cn;

谈大龙 (1940 —),男,博士生导师,研究兴趣为机器人学.

(上接第 756 页)

[9] ESKANDARIAN A, BEDEWI N E, KRAMER B M, et al. Dynamics modeling of robotic manipulators using an artificial neural network [J]. *J of Robotic Systems*, 1994, 11(1): 41 - 56.

[10] HARRIS C J, MOORE C G, BROWN M. *Intelligent Control: Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd., 1993.

[11] LIM C M, HIYAMA T. Application if fuzzy logic control to a manipulator [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1991, 7(5): 688 - 691.

[12] PIRJANIAN P. Multiple objective action selection in behavior-based control [C] // *Proc of the 6th Symposium for Intelligent Robotic Systems*. Edinburgh, Scotland: [s.n.], 1998: 83 - 92.

[13] CHEN C L. A Pneumatic Model-following Control system using a fuzzy adaptive controller [J]. *Automatica*, 1993, 29(4): 1101 - 1105.

[14] WANG L X. Modeling and control of hierarchical systems with fuzzy systems [J]. *Automatica*, 1997, 33(6): 1041 - 1053.

[15] SLOTINE J E, LI W. *Applied Nonlinear Control* [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-hall, 1991.

[16] LOHMILLER W, SLOTINE J J E. Contraction analysis for nonlinear systems [J]. *Automatica*, 1998 34(6): 683 - 696.

作者简介:

吴玉香 (1968 —),女,博士生,1988 年毕业于北京科技大学自动化系,现为华南理工大学自动化科学与工程学院副教授.研究方向为非线性控制、智能控制理论与应用, E-mail: xyuwu@scut.edu.cn;

王 灏 (1964 —),男,现任职广州西门子公司;

毛宗源 (1936 —),男,教授,博士生导师,1961 年毕业于大连理工大学工业自动化专业,已发表论文百多篇,目前研究方向是现代控制理论及应用、电力电子技术;

TAM Peter K.S. 博士,副教授,香港理工大学电子与资讯工程学系教师.