

## 基于改进人工协调场的多机器人避碰算法

吴 晋\*, 张国良, 汤文俊, 孙一杰

(第二炮兵工程大学 301 教研室, 西安 710025)

(\*通信作者电子邮箱 wujintj@163.com)

**摘 要:**针对多机器人系统中避碰问题,提出一种基于改进人工协调场的多机器人避碰算法。首先采用凸化障碍,子目标主动选择方法,解决人工协调场在有非凸障碍环境中的“死锁”问题;其次建立基于速度和距离的排斥力模型,以克服人工协调场对空间利用率低的缺陷,尤其是目标点与障碍物距离较近机器人无法抵达的情况;最后设计一种力混合器模型,并基于此模型以达到避免人工协调场中的运动抖动的效果。仿真实验证明该算法对解决有障碍环境下多机器人避碰问题的有效性和可靠性,增强了多机器人系统对复杂环境的适应性。

**关键词:**人工协调场;避碰算法;多机器人系统;分布式系统

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

### Collision avoidance algorithm for multi-robot system based on improved artificial coordinating field

WU Jin\*, ZHANG Guoliang, TANG Wenjun, SUN Yijie

(Teaching and Research Section 301, The Second Artillery Engineering University, Xi'an Shaanxi 710025, China)

**Abstract:** Concerning the collision avoidance problem for multi-robot system, a collision avoidance algorithm based on improved artificial coordinating field was advanced. Firstly, a method was adopted, which made obstacle convex and chose new target initiatively to resolve the deadlock problem with artificial coordinating field in non-protruding polygon obstacle surroundings. Secondly, a repelling force was modeled based on velocity and distance to overcome the problem of low space utilization ratio with artificial coordinating field, especially in the situation that the target was near by the obstacle. Lastly, a force mixer was designed, and it was applied to avoidance movement tremble. The experimental results indicate that, the algorithm is effective and reliable to resolve collision avoidance problem for multi-robot system, and it improves the adaptability of multi-robot system for complicated environment.

**Key words:** artificial coordinating field; collision avoidance algorithm; multi-robot system; distributed system

## 0 引言

避碰避障是多机器人系统成功应用于实际环境的关键环节。因此,多机器人系统避碰算法成为了近年来机器人技术研究的热点问题。

目前,常用的多机器人避碰算法主要有 C 空间法、单元分解法、特权优先级法、交通规则法、磋商法和人工势场法等。其中基于人工势场法的多机器人避碰算法以其简单、安全、易行的优点,广受青睐;但其完备性的缺失使得在避碰过程中易出现运动抖动、“死锁”,发现运动抖动<sup>[1]</sup>及非受迫性碰撞<sup>[2]</sup>等问题。

针对人工势场法在避碰过程中出现不足,学者们开展了大量研究:赵东等<sup>[3]</sup>将交通规则法、磋商法和人工势场法相结合,提出了基于广义势场的多机器人避碰方法;景兴建等<sup>[4-5]</sup>将人工协调场应用于多机器人避碰及编队控制;付帅等<sup>[6]</sup>在文献[4]的基础上通过改进引力势函数使人工协调场成功应用于运动编队中;文献[7]提出了一种基于李亚普诺夫函数形式的势场函数,有效解决了单机机器人静态环境下避碰问题;杨甜甜等<sup>[8]</sup>在文献[7]基础上提出利用导航函数法解决多机器人避碰避障问题;文献[9]提出一种分叉势场法,

并应用其来解决分布式多机器人系统中的避碰问题;胡志华等<sup>[10]</sup>通过加入柔化因子改进一般势场力,较好地解决了人工势场法在离散控制中的振荡问题;王芳等<sup>[11]</sup>引入势场栅格对人工势场法进行改进,对可克服传统人工势场法中的局部极小点问题有一定的作用,但与栅格的划分有密切关系;Jaradat 等<sup>[12-13]</sup>利用障碍物斥力和目标点引力的模糊模型解决局部极小问题;于振中等<sup>[14]</sup>应用“填平势场”使机器人走出陷阱区域;李书杰等<sup>[15]</sup>提出了一种基于灰色定性理论的人工势场算法以解决局部陷阱问题。

这些方法大部分在传统人工势场的基础上通过局部调整使机器人走出陷阱,并未从根本上解决问题。因此,本文以多机器人系统编队控制为应用背景,同时以避免机器人运动“死锁”和克服机器人运动抖动为目标,提出基于改进人工协调场的多机器人避碰算法。

## 1 问题描述

在有静态障碍的环境中,考虑一组由  $N$  个机器人构成的分布式多智能体编队,其中各机器人的 ID 号依次为  $R_1, R_2, \dots, R_N$ 。关于环境中障碍有如下定义。

**定义 1** 设障碍  $m$  可以用二维对边区域  $O_m$  表示,障碍

收稿日期:2013-05-13;修回日期:2013-07-20。 基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2012K06-45)。

**作者简介:**吴晋(1990-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向:多无人平台协同控制; 张国良(1970-),男,四川成都人,教授,硕士生,主要研究方向:先进控制; 汤文俊(1986-),男,安徽黄山人,博士研究生,主要研究方向:多智能体协同定位与导航; 孙一杰(1986-),男,云南大理人,博士研究生,主要研究方向:多机器人系统协调导航与规划。

$m$  的边界用  $\partial O_m$  表示,若障碍  $m$  的边界  $\partial O_m$  为凸多边形,则称障碍  $m$  为凸障碍;否则称障碍  $m$  为非凸障碍。

**定义2** 设点集  $D \subset \partial O_m$  为多边形区域  $O_m$  的顶点,若  $p \in D$  为凸角顶点,则称顶点  $p$  为凸角点;否则称顶点  $p$  为非凸角点。

为了让研究结论更方便地应用于实际平台中,考虑采用离散运动模型对多机器人编队避碰算法进行讨论。机器人的离散运动模型如下表示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{v}_i(k)T \\ \mathbf{v}_i(k+1) = \mathbf{v}_i(k) + \mathbf{u}_i(k)T/m_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $\mathbf{x}_i(k)$ 、 $\mathbf{v}_i(k)$  分别是机器人  $R_i$  在  $k$  时刻的位置矢量和速度矢量;  $T$  是系统的采样间隔,  $T$  越小,离散模型的精度越高,当然系统的采样间隔与传感器的采样频率和处理器的计算能力有关;  $\mathbf{u}_i(k)$  是机器人  $R_i$  在  $k$  时刻的控制输入量;  $m_0$  为机器人  $R_i$  的质量。

在机器人  $R_i$  运行过程中,为确保其自身的安全,机器人  $R_i$  会主动扫描周围一定范围内的其他机器人及障碍,将这个扫描半径称为安全半径  $R_{\text{safe}}$ 。机器人的安全半径  $R_{\text{safe}}$  与其运行最大速度和制动能力有关,假设编队中所有机器人都有相同的安全半径。将以机器人  $R_i$  的质心为圆点,以  $R_{\text{safe}}$  为半径的圆域称为机器人  $R_i$  的安全区域。进入彼此安全区域的两个机器人称为相遇。当机器人相遇时会进行交流,共享环境信息及彼此状态信息。

机器人根据自身状态同时结合与邻居通信获得的信息做出相应的避碰动作。机器人采取的避碰动作是人工协调场中各种虚拟力对其共同作用的结果。

## 2 人工协调场

为了从根本上克服传统人工势场法中的“死锁”问题,景兴建等<sup>[4]</sup>提出了人工协调场法,在传统排斥力场中引入协调力的概念,并把吸引力、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,以克服传统人工势场法的不足。人工排斥协调场公式如下:

排斥协调场中的虚拟力:

$$\mathbf{F}_e(\mathbf{x}) = \mathbf{F}_r(\mathbf{x}) + \mathbf{F}_n(\mathbf{x})$$

排斥协调场排斥力:

$$\mathbf{F}_r(\mathbf{x}) = k_r(\mathbf{x} - \mathbf{g}_0(\mathbf{x}))$$

排斥协调场协调力:

$$\mathbf{F}_n(\mathbf{x}) = k_n \lambda \mathbf{T}_A(\mathbf{x} - \mathbf{g}_0(\mathbf{x}))$$

其中:  $k_r$ 、 $k_n$  分别为位置增益系数;  $\mathbf{g}_0(\mathbf{x})$  表示障碍边界上距离机器人最近的点  $z$ , 即  $z = \mathbf{g}_0(\mathbf{x}) = \arg \min(\mathbf{x} - \mathbf{z})$ ;  $\lambda \in \{-1, 0, 1\}$  为协调因子,其由协调策略而定;  $\mathbf{T}_A = [0, 1; -1, 0]$  为矢量旋转矩阵。

人工协调场较好地解决了传统人工势场法中的“死锁”问题,很大程度上改善了人工势场法在机器人避碰避障方面的应用效果。但依然有以下几点需要解决或克服: 1) 在有非凸障碍环境中,机器人容易在障碍非凸角点处发生“死锁”。2) 当机器人以较大速度偏离目标点运行时(大多是由避碰避障引起的),由于仅靠传统引力无法较快消除引力场方向上的速度,致使机器人将绕目标点做大弧线运动。3) 排斥力场都有一定的作用半径(即安全半径),当机器人与障碍之间

距离小于安全半径时,无论机器人相对障碍的运动状态如何,都将受到排斥作用。因此仅仅基于距离的排斥力场对空间的利用率不高,尤其当目标点距障碍较近(小于安全距离)时,机器人无法抵达目标点。4) 当机器人已经到达目标点附近时,由于势能转化的动能未耗散,故在机器人将目标点附近做振荡运动,甚至出现极限环。

## 3 人工协调场的改进

### 3.1 子目标选取策略

在运动过程中,根据自身状态、环境信息和目标位置,机器人会主动选取子目标,最终向目标靠拢。设  $k$  时刻,机器人  $R_i$  的状态为  $\mathbf{X}_i(k) = (\mathbf{x}_i(k), \mathbf{v}_i(k))^T$ , 通过邻居共享及自己探测的环境信息为  $O_i(k)$ , 最终目标为  $T_i$ , 则此时机器人  $R_i$  的子目标为  $\text{Tag}_i(k) = F(\mathbf{X}_i(k), O_i(k), T_i) \circ F(\mathbf{X}_i(k), O_i(k), T_i)$  为取目标函数,具体选择过程如下:

**步骤1** 判断是否有障碍在机器人与最终目标之间。若无则最终目标即为子目标;若有则进入步骤2。

**步骤2** 对障碍进行凸化处理,即若  $c_1, c_2, \dots$  为障碍  $O_i(k)$  的边界凸角点,则依次连接所有凸角点,获得新多边形。若新多边形中仍存在非凸角点,则继续凸化,直至新多边形中无非凸角点存在。用各凸角点围成的轮廓区域代替原障碍区域,如图1所示。

**步骤3** 将仅由凸化后多边形同一凸角点的两边延长线构成的开区域称为点区,如图1中区域A和区域D;将由凸化后多边形两边延长线及另一边围成的封闭区域称为边区,如图1中区域B和区域C。如图1,若机器人在点区A中,则比较  $c_i$  与  $c_m$  到最终目标  $\text{Tag}$  的距离,选择距离较小者;若机器人在边区B中,则比较  $c_n$  与  $c_m$  到最终目标  $\text{Tag}$  距离,选择距离较小者。

**步骤4** 假设步骤3中选择的凸角点为  $c_m$ , 则在  $c_n c_m$  的延长线上选取距  $c_m$  为  $r_0$  的一点,此点即为子目标  $\text{Tag}_i(k)$ 。其中  $r_0 > R$ ,  $R$  为机器人自身半径。

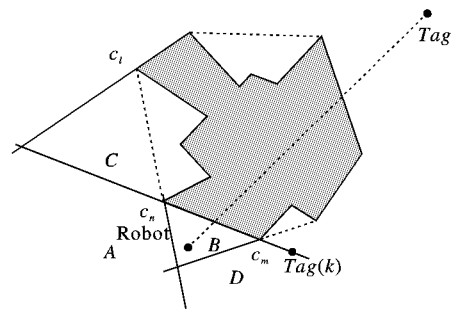


图1 凸化障碍及选择子目标

### 3.2 吸引力修正算法

由传统人工势场法中吸引力模型知,机器人  $R_i$  的子目标对其的引力模型如下:

$$\mathbf{F}_{ai} = -k_a(\mathbf{x}_i(k) - \text{Tag}_i(k))$$

其中  $k_a$  为引力系数。为了避免在目标点附近出现振荡,且使机器人尽快收敛到目标点,在机器人运行过程中,当速度方向与机器人到目标的矢量方向夹角大于一定阈值时,要对目标的引力进行修正。修正方法如下:

$$\mathbf{F}_{vi} = \begin{cases} 0, & \alpha \leq \pi/2 \\ -k_v \|\mathbf{v}_i(k)\| \mathbf{e}(s_n) \cos \alpha, & \alpha > \pi/2 \end{cases}$$

$$F_{hi} = \begin{cases} 0, & \alpha \leq \alpha_0 \\ -k_h [v_i(k) - \|v_i(k)\| e(s_{ri}) \cos \alpha], & \alpha > \alpha_0 \end{cases}$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} \pi/6, & \|s_{ri}\| \geq l_0 \\ \pi \|s_{ri}\| / (6l_0), & \|s_{ri}\| < l_0 \end{cases}$$

$$F_{ai} = k_a (Tag_i(k) - x_i(k)) + F_{ri} + F_{hi} \quad (2)$$

其中:  $F_{ri}$  为纵向修正,  $F_{hi}$  为横向修正,  $s_{ri}$  为由机器人  $R_i$  指向目标位置的矢量,  $\alpha = \langle v_i(k), s_{ri} \rangle$  为机器人  $R_i$  速度与  $s_{ri}$  的夹角,  $\alpha_0$  为引力修正角度阈值,  $l_0$  为引力修正距离阈值。

### 3.3 排斥力改进模型

设机器人  $R_j$  相对于机器人  $R_i$  的位置矢量为  $s_{ij} = x_j - x_i$ , 相反, 机器人  $R_i$  相对于机器人  $R_j$  的位置矢量为  $s_{ji} = -s_{ij}$ 。若发现机器人  $R_j$  进入其安全区域内且  $v_i$  在  $s_{ij}$  方向上有非零分量  $v_{ij}$  时, 机器人  $R_i$  会受来自机器人  $R_j$  方向的排斥力  $F_{rij}$ , 方向与  $s_{ij}$  相反; 否则, 机器人  $R_i$  不受机器人  $R_j$  的影响。排斥力  $F_{rij}$  与相对速度  $v_{ij}$  成正相关, 与  $s_{ij}$  成负相关。假设机器人  $R_i$  不受引力的条件下, 考虑如下两种特殊情形。

情形 1 机器人  $R_j$  静止在  $x_j$ , 机器人  $R_i$  在机器人  $R_j$  的安全区域边沿在以速度  $v_i$  向机器人  $R_j$  运动 (速度  $v_i$  方向与  $s_{ij}$  相同)。期望的结果是机器人  $R_i$  以任意速度  $v_i$  ( $0 < \|v_i\| \leq v_{\max}$ ) 开始运动, 机器人  $R_i$  都会做匀变速运动且最终停止在距离机器人  $R_j$  为  $s = 2R + \Delta$  (两机器人质心距离) 的位置, 其中  $R$  为机器人自身半径,  $\Delta$  为安全余量。

设机器人  $R_i$  在排斥力的作用下匀减速至期望位置, 加速度为  $a_i = a$ , 则由离散模型 (1) 得:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k)T \\ v_i(k+1) = v_i(k) + a_i(k)T \end{cases} \Rightarrow$$

$$x_i(k+1) = x_i(0) + (k+1)v_i(0)T + \frac{k(k+1)}{2}aT^2 \quad (3)$$

设在  $K+1$  时刻应恰有  $v_i(K+1) = 0$ ,  $x_i(K+1) = x_j - s e_{ij}$ ,  $e_{ij}$  为  $s_{ij}$  的单位向量,  $K = \frac{\|v_i(0)\|}{\|a\|T} - 1$ , 则有:

$$x_j - x_i(0) - s e_{ij} = \frac{\|v_i(0)\| \|v_i(0)\|}{\|a\|} - \frac{a \|v_i(0)\| T}{2 \|a\|} + \frac{a \|v_i(0)\|^2}{2 \|a\|^2} \quad (4)$$

因为  $v_i(0) = -\frac{\|v_i(0)\| a}{\|a\|}$ , 将其代入式 (4) 得:

$$\|a\| \|2(x_j - x_i(0) - s e_{ij}) - v_i(0)T\| \frac{v_i(0)}{\|v_i(0)\|} = \|v_i(0)\| v_i(0) \quad (5)$$

因为  $a = -\frac{\|a\| \|v_i(0)\|}{\|v_i(0)\|}$ , 将其代入式 (5) 得:

$$a = -\frac{\|v_i(0)\| \|v_i(0)\|}{\|2(x_j - x_i(0) - s e_{ij}) - v_i(0)T\|}$$

若初始时刻为  $k$  时刻便有加速度模型为:

$$a_i(k) = -\frac{\|v_i(k)\| \|v_i(k)\|}{\|2(x_j - x_i(k) - s e_{ij}) - v_i(k)T\|} \quad (6)$$

情形 2 机器人  $R_i$  在  $R_j$  的安全区域边沿,  $R_i$ 、 $R_j$  分别以速度  $v_i$ 、 $v_j$  相向运动。期望结果是  $R_i$ 、 $R_j$  分别以任意速度  $v_i$ 、 $v_j$  ( $0 < \|v_i\| \leq v_{\max}$ ,  $0 < \|v_j\| \leq v_{\max}$ ) 相向匀减速运动, 最终都停在相距  $s = 2R + \Delta$  (两机器人质心距离) 处。

由情形 1 结论 (6), 可得如下定理:

**定理** 若两机器人分别按式 (7)、(8) 形式取加速度则情形 2 中的期望结果可以实现。

$$a_i(k) = \frac{-\|v_i(k)\| \|v_i(k)\|}{\|2c_i(k)(x_j(k) - x_i(k) - s e_{ij}) - v_i(k)T\|} \quad (7)$$

$$a_j(k) = \frac{-\|v_j(k)\| \|v_j(k)\|}{\|2c_j(k)(x_i(k) - x_j(k) - s e_{ji}) - v_j(k)T\|} \quad (8)$$

其中:

$$c_i(k) = \frac{\|v_i(k)\|}{\|v_i(k)\| + \|v_j(k)\|}$$

$$c_j(k) = \frac{\|v_j(k)\|}{\|v_i(k)\| + \|v_j(k)\|}$$

证明 令  $m_i(k) = \|2c_i(k)(x_j(k) - x_i(k) - s e_{ij}) - v_i(k)T\|$ ,  $m_j(k) = \|2c_j(k)(x_i(k) - x_j(k) - s e_{ji}) - v_j(k)T\|$ 。因为  $\|2c_j(k)(x_i(k) - x_j(k) - s e_{ji}) - v_j(k)T\| = \|2c_i(k)(x_j(k) - x_i(k) - s e_{ij}) - v_i(k)T\| = \|v_i(k)\|$ , 故有  $\|v_i(k)\|/m_i(k) = \|v_j(k)\|/m_j(k)$ 。进而有:

$$\begin{cases} c_i(k+1) = c_i(k) \\ c_j(k+1) = c_j(k) \end{cases} \quad (9)$$

因为  $\|1 - \|v_i(k)\|T/m_i(k)\|^2 = \|1 - 2\|v_i(k)\|T/m_i(k) + \|v_i(k)\|^2T^2/m_i(k)^2\|$ , 则可以得到:

$$\|1 - \|v_i(k)\|T/m_i(k)\|^2 = \|e_{ij} + \|v_i(k)\|T\|^2T^2$$

$$e_{ij}/[m_i(k)]^2 - 2e_{ij} \frac{\|v_i(k)\|(\|v_i(k)\| + \|v_j(k)\|)T}{(\|v_i(k)\| + \|v_j(k)\|)m_i(k)} \|$$

因为  $2c_i(k)[x_j(k) - x_i(k) - s e_{ij}] - v_i(k)T = m_i(k)e_{ij}$ ,  $v_j(k) - v_i(k) = (\|v_i(k)\| + \|v_j(k)\|)e_{ij}$ , 故可得:

$$\|1 - \|v_i(k)\|T/m_i(k)\|^2 / \|n_i(k)\| = 1/m_i(k)$$

$$n_i(k) = 2c_i(k)[x_j(k) - x_i(k) - s e_{ij} + v_j(k)T -$$

$$v_i(k)T] - v_i(k)[1 - \|v_i(k)\|T/m_i(k)]T$$

进而有  $a_i(k+1) = -\|v_i(k)\| \|v_i(k)\|/m_i(k)$ , 故有  $a_i(k+1) = a_i(k)$ , 同理有  $a_j(k+1) = a_j(k)$ 。故机器人  $R_i$ 、 $R_j$  均为匀变速运动。令  $a_i(k) = a_i$ 、 $a_j(k) = a_j$ 。设当  $K+1$  时刻恰有  $v_i(K+1) = 0$ , 则有  $K = \frac{\|v_i(0)\|}{\|a_i\|T} - 1$ , 将其代入式 (3) 中

得:

$$x_i(K+1) - x_i(0) = \|v_i(0)\| \|v_i(0)\|/\|a_i\| - \frac{\|v_i(0)\| \|a_i\|T}{2 \|a_i\|} + \frac{a_i \|v_i(0)\|^2}{2 \|a_i\|^2} \quad (10)$$

因为  $v_i(0) = -\|v_i(0)\| a_i/\|a_i\|$ , 故将其代入式 (10) 得:

$$\|a_i\| [2[x_i(K+1) - x_i(0)] - v_i(0)T] = \|v_i(0)\| \|v_i(0)\|$$

又因为  $\|a_i\| [2c_i(0)[x_j(0) - x_i(0) - s e_{ij}] - v_i(0)T] = \|v_i(0)\| \|v_i(0)\|$ , 故有:  $x_i(K+1) = c_i(0)[x_j(0) - x_i(0) - s e_{ij}] + x_i(0)$ , 同理有  $x_j(K+1) = c_j(0)[x_i(0) - x_j(0) - s e_{ji}] + x_j(0)$ 。

因此有:

$$x_j(K+1) - x_i(K+1) = [c_j(0) + c_i(0) - 1][x_i(0) - x_j(0)] - c_j(0)s e_{ji} + c_i(0)s e_{ij} = s e_{ij}$$

由此可知, 按式 (7)、(8) 取加速度, 可以达到预期结果。

因此假设机器人  $R_i$  不受引力作用的条件下,可取机器人  $R_j$  对机器人  $R_i$  的排斥力为:

$$\mathbf{F}_{rij} = \begin{cases} m_0 \mathbf{a}_{rij}(k), & \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\| \leq R_{\text{safe}} \\ 0, & \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\| > R_{\text{safe}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\mathbf{a}_{rij}(k) = \frac{-m_0 \|\mathbf{v}_{rij}(k)\| \|\mathbf{v}_{rij}(k)\|}{\|2c_{ij}(k)(\mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_i(k) - s\mathbf{e}_{ij}) - \mathbf{v}_{rij}(k)T\|}$$

$$c_{ij}(k) = \frac{\|\mathbf{v}_{rij}(k)\|}{\|\mathbf{v}_{rij}(k)\| + \|\mathbf{v}_{ji}(k)\|}$$

同理,将环境中静态障碍  $O_m$  视为速度为0的机器人时,由式(11)便可得到环境障碍  $O_m$  对机器人  $R_i$  的排斥力为:

$$\mathbf{F}_{rim} = \begin{cases} m_0 \mathbf{a}_{rim}(k), & \|\mathbf{z} - \mathbf{x}_i\| \leq R_{\text{safe}} \\ 0, & \|\mathbf{z} - \mathbf{x}_i\| > R_{\text{safe}} \end{cases}$$

$$\mathbf{a}_{rim}(k) = \frac{-\|\mathbf{v}_{rim}(k)\| \|\mathbf{v}_{rim}(k)\|}{\|2(\mathbf{z} - \mathbf{x}_i(k) - s^* \mathbf{e}_{im}) - \mathbf{v}_{rim}(k)T\|}$$

其中:  $\mathbf{z}$  表示障碍边界上距离机器人最近的点,即  $\mathbf{z} = \arg \min(\mathbf{x}_i(k) - \mathbf{x}), \mathbf{x} \in \partial O_m, s^* = R + \Delta$  为机器人与环境障碍边界之间最小距离。机器人  $R_i$  受到的合排斥力为:

$$\mathbf{F}_{ri} = \sum_{j \in N_i} \mathbf{F}_{rij}$$

其中  $N_i$  为对机器人  $R_i$  有排斥影响的机器人及环境障碍集合。以上两种情况是在未考虑外界引力作用的条件下进行的,因而在广义协调场中机器人  $R_i$  在避碰时要屏蔽沿排斥力合力反方向上的引力分量,即机器人  $R_i$  所受的最终引力为:

$$\mathbf{F}_{ai} = k_a(\mathbf{Tag}_i(k) - \mathbf{x}_i(k)) + \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_h - \tilde{\mathbf{F}}_{aid}$$

$\tilde{\mathbf{F}}_{aid}$  为排斥力合力反方向上的引力分量,其具体形式如下:

$$\tilde{\mathbf{F}}_{aid} = \begin{cases} 0, & \theta \leq \pi/2 \\ \|\mathbf{F}_{ai}\| \mathbf{e}(\mathbf{F}_{ri}) \cos \theta, & \theta > \pi/2 \end{cases}$$

其中  $\theta = \langle \mathbf{F}_{ai}, \mathbf{F}_{ri} \rangle$ 。

### 3.4 协调因子选择策略

为了更好地改善机器人在避碰过程中出现的死锁现象,为机器人主动加入协调力作用。机器人  $R_i$  协调力的模型为:

$$\mathbf{F}_{ri} = \lambda k_r F_{r0} \mathbf{T}_A \mathbf{e}(\mathbf{F}_{ri}) \quad (12)$$

其中:  $k_r > 0$  为协调力系数;  $F_{r0} > 0$  为协调力常量;  $\mathbf{T}_A = [0, 1; -1, 0]$  为旋转矩阵;  $\mathbf{e}(\cdot)$  表示取矢量的单位向量函数。由式(12)可知,协调力总是指向排斥力法线方向,且若  $\mathbf{F}_{ri} = 0$ , 则有  $\mathbf{F}_{ri} = 0$ ;  $\lambda \in \{-1, 0, 1\}$  为协调因子。协调因子直接决定着人工协调场的应用效果,因此建立完善的系统的协调因子选择策略是必要的。为了使人工协调场在多机器人避碰障碍中有较好的应用效果,设计如下协调因子选择策略:

1) 当  $N_i$  中元素个数大于1时,  $\lambda = 1$ 。

2) 当  $N_i$  中元素个数等于1时,且若  $N_i = \{R_j\}$  但  $N_j \neq \{R_i\}$  时,设目标相对机器人的位置矢量为  $\mathbf{s}_T$ , 障碍相对机器人的位置矢量为  $\mathbf{s}_O$ , 矢量  $\mathbf{s}_T$  到矢量  $\mathbf{s}_O$  的到角为  $\psi$ , 则有:

$$\lambda = \begin{cases} -1, & \psi \in (-\pi/2, 0) \\ 0, & \psi \in (-\pi, -\pi/2] \cup [\pi/2, \pi] \\ 1, & \psi \in [0, \pi/2) \end{cases} \quad (13)$$

3) 当  $N_i = \{R_j\}$  且  $N_j = \{R_i\}$  时,若  $R_i, R_j$  分布在  $\mathbf{Tag}_i, \mathbf{Tag}_j$  的连线两侧,则  $R_i, R_j$  根据各自的  $\mathbf{s}_T, \mathbf{s}_O$  分别取  $\lambda, \lambda$  按式(13)计算;若  $R_i, R_j$  分布在  $\mathbf{Tag}_i, \mathbf{Tag}_j$  的连线同侧,以距离  $\mathbf{Tag}_i, \mathbf{Tag}_j$  的连线较近者为参考,假设为  $R_i$ ,则根据  $R_i$  的  $\mathbf{s}_T, \mathbf{s}_O$  由式(13)取得  $\lambda$  值,  $R_i, R_j$  取同一  $\lambda$  值。

4) 当目标位置  $\mathbf{Tag}_i$  与障碍物  $O_m$  边界最近点  $\mathbf{z}$  距离小于安全半径  $R_{\text{safe}}$  时,令  $\varphi$  为障碍相对目标的位置矢量与机器人相对目标的位置矢量之间的夹角,即  $\varphi = \langle \mathbf{e}(\mathbf{z} - \mathbf{Tag}_i), \mathbf{e}(\mathbf{x}_i - \mathbf{Tag}_i) \rangle$ 。若  $\varphi > \pi/2$ , 则应有  $\lambda = 0$ 。

考虑协调力总是指向排斥力的法线方向,为了避免机器人非受迫撞上排斥力法线方向上的障碍,协调力应根据周围环境大小可调,即协调力系数  $k_r$  的大小应与排斥力法线方向的障碍分布情况有关。在以机器人  $R_i$  的质心为圆心,  $r_r$  为半径的圆域内,由排斥力方向开始,当  $\lambda = 1$ , 逆时针扫描  $180^\circ$ ; 当  $\lambda = -1$ , 顺时针扫描  $180^\circ$ 。设扫描到第一个障碍(可为环境障碍或其他机器人)时的扫描角为  $\varphi$ , 则:

$$k_r = \begin{cases} 0, & \varphi \in [0, \pi/2] \\ \sin(\varphi - \pi/2), & \varphi \in (\pi/2, \pi] \end{cases}$$

当未在规定圆域内扫描到障碍时,令  $\varphi = \pi$ 。

### 3.5 阻尼区的建立

为避免机器人在最终目标附近出现振荡或极限环现象,在目标周围一定范围内建立阻尼区,以使机器人快速收敛到目标位置。若有  $\|\mathbf{Tag}_i - \mathbf{x}_i\| < R_d$  ( $R_d$  为阻尼区半径), 机器人  $R_i$  便受阻尼力的作用。为了耗散机器人当前多余的动能,同时还要保证机器人最终到达预定目标,故可选与速度有关的阻尼作用。机器人  $R_i$  受的阻尼力的模型为:

$$\mathbf{F}_{di} = -k_d(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}) \quad (14)$$

其中:  $k_d > 0$  为阻尼系数,  $\mathbf{v}$  为编队中心期望的速度。由式(14)知,阻尼力与机器人  $R_i$  当前的速度有关,方向始终与机器人  $R_i$  当前相对速度相反。

### 3.6 力混合器

定义3 若机器人  $R_j$  到机器人  $R_i$  的距离  $\|\mathbf{s}_{ij}\| \approx 2R + \Delta$ , 且对机器人  $R_i$  没有排斥作用,则称机器人  $R_j$  为机器人  $R_i$  的邻近障碍。同理,若环境障碍  $O_m$  到机器人  $R_i$  的质心距离  $\|\mathbf{s}_{im}\| \approx R + \Delta$ , 且对机器人  $R_i$  没有排斥作用,则也称环境障碍  $O_m$  为机器人  $R_i$  的邻近障碍。

力混合器,顾名思义是处理力合成的部分。其输入是广义协调场中各种虚拟力,输出便是机器人的输入控制量。力混合器主要作用是处理邻近避碰、速度超限和运动抵消等特殊情况。由排斥力模型可知,当机器人相对障碍没有速度时,即使障碍离机器人很近,对机器人也没有排斥作用。为了确保机器人较好规避邻近障碍,需要屏蔽掉指向邻近障碍的各种虚拟力合力的分量。机器人  $R_i$  的力混合器中的邻近避碰模型为:

$$u_{1i} = \sum \mathbf{F} - \sum_{j \in Q_i} \|\sum \mathbf{F}\| \cos \langle \sum \mathbf{F}, \mathbf{s}_{ij} \rangle \mathbf{e}(\mathbf{s}_{ij})$$

其中:  $\sum \mathbf{F}$  表示机器人  $R_i$  所受的各种虚拟力的合力,  $\mathbf{s}_{ij}$  表示由机器人  $R_i$  指向邻近障碍的相对位置矢量,  $Q_i$  为机器人  $R_i$  周围的邻近障碍集合。现实中由于各种约束存在使得机器人的速度不可能无限大,而是存在最大速度  $\mathbf{v}_m$ 。鉴于此对速度作如下处理:

$$\mathbf{v}_i(k) = \begin{cases} \mathbf{v}_i(k), & \|\mathbf{v}_i(k)\| \leq v_{\max} \\ v_{\max} \mathbf{v}_i(k) / \|\mathbf{v}_i(k)\|, & \|\mathbf{v}_i(k)\| > v_{\max} \end{cases}$$

易得力混合器中的处理速度超限的数学模型如下:

$$u_{2i}(k) = \begin{cases} u_{1i}(k), & \|\mathbf{v}_{1i}(k+1|k)\| \leq v_{\max} \\ v_{\max} \frac{\mathbf{v}_{1i}(k+1|k)}{\|\mathbf{v}_{1i}(k+1|k)\|}, & \|\mathbf{v}_{1i}(k+1|k)\| > v_{\max} \end{cases}$$

$$v_{1i}(k+1|k) = v_i(k) + u_{1i}(k)T/m_0$$

在传统人工势场中机器人运动易出现抖动现象,尤其是在离散系统中,主要是因为速度的大角度转向所致。故为了消除抖动现象,力混合器还要对速度作如下约束:

$$v_i(k) = \begin{cases} v_i(k), & \beta \leq \pi/2 \\ 0, & \beta > \pi/2 \end{cases}$$

$$v_{2i}(k+1|k) = v_i(k) + u_{2i}(k)T/m_0$$

$$\beta = \langle v_{2i}(k+1|k), v_i(k) \rangle$$

由此可得力混合器中消除抖动模块的数学模型为:

$$u_{3i}(k) = \begin{cases} u_{2i}(k), & \beta \leq \pi/2 \\ -v_i(k)/T, & \beta > \pi/2 \end{cases}$$

力混合器的工作流程如图 2 所示。由力混合器的工作原理知,消除抖动模块的输出便为控制输入量,即  $u_i(k) = u_{3i}(k)$ 。

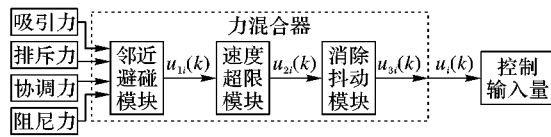


图2 力混合器的工作流程

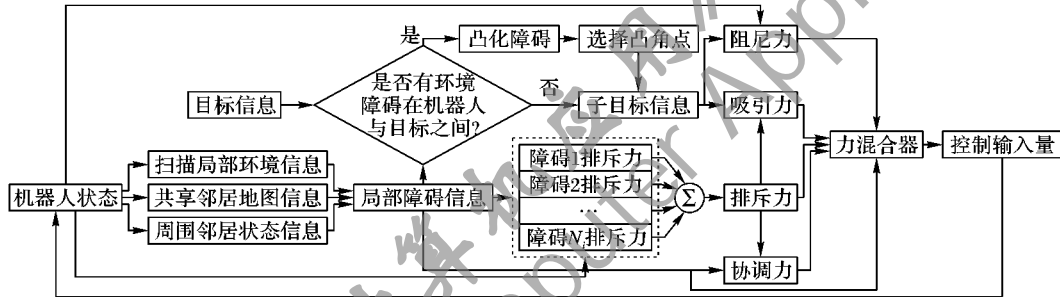


图3 基于广义协调场的多机器人避碰流程

## 5 实验仿真与分析

在实验中考考虑机器人的半径为  $R = 0.225 \text{ m}$ , 安全半径  $R_{\text{safe}} = 1.5 \text{ m}$ , 阻尼区域半径  $R_d = 1 \text{ m}$ 。为了确保机器人的安全, 取安全余量  $\Delta = 0.1 \text{ m}$ , 故有  $s = 2R + \Delta = 0.55 \text{ m}$ 。离散采样时间  $T = 0.2 \text{ s}$ , 机器人的最大允许速度为  $v_{\text{max}} = 0.5 \text{ m/s}$ 。

**实验1** 考虑由4个机器人构成的机器人编队, 初始时机器人分别静止在一正方形的四个顶点处, 机器人  $R_1$  至  $R_4$  的位置坐标分别为  $(-1.5, 1.5)$ ,  $(1.5, 1.5)$ ,  $(1.5, -1.5)$ ,  $(-1.5, -1.5)$ 。任务是让这4个机器人重新构成新的正方形队形, 机器人  $R_1$  至  $R_4$  的目标位置坐标分别为  $(3.0, -3.0)$ ,  $(-3.0, -3.0)$ ,  $(-3.0, 3.0)$ ,  $(3.0, 3.0)$ 。

显然在完成上述任务的过程中机器人间的避碰是不可避免的。在基于改进人工协调场的作用下, 各机器人的运动轨迹如图 4 所示。各时刻各机器人之间最小距离如图 5 所示。由图 4 中的各机器人初始位置可知, 若采用传统人工势场法必然会出现抖动和死锁现象, 且任务最终无法完成。而采用本文算法, 由图 5 显然可知, 各机器人都较好完成了任务, 过程中成功完成了避碰动作, 且没有抖动现象。且由图 5 知, 整个过程中各机器人间都保持了安全的距离, 证明了该算法安全可靠。

**实验2** 考虑由4个机器人构成的编队在有静态环境障碍的环境中运行, 机器人  $R_1$  至  $R_4$  的初始位置坐标分别为  $(-1.0, 2.5)$ ,  $(-3.0, 3.0)$ ,  $(-3.0, 0.0)$ ,  $(-2.0, 1.6)$ 。任务

## 4 避碰流程

基于改进人工协调场的多机器人避碰算法流程如图 3 所示。算法具体步骤如下:

首先, 机器人利用自身携带扫描局部环境, 同时与邻居进行信息共享, 进而获得较为详细的环境信息, 再结合邻居状态信息, 确定局部障碍信息。

其次, 根据局部障碍信息判断是否有环境障碍在机器人与目标之间, 若判断为“是”, 则进行选择新的子目标; 若为“否”, 则以既定目标为当前子目标。结合子目标信息, 计算其对机器人的引力。

第三, 机器人根据局部障碍信息及自身状态信息产生排斥力, 同时屏蔽沿排斥力方向上的引力。

第四, 结合局部障碍信息及排斥力, 机器人主动产生协调力。

最后将引力、排斥力、协调力和阻尼力输入到力混合器中, 力混合器结合局部障碍信息进行邻近避碰、速度超限和运动消抖等特殊处理。力混合器的输出即为控制输入量。

是让机器人编队构成正边形队形, 机器人  $R_1$  至  $R_4$  的目标位置坐标分别为  $(6.5, 3.5)$ ,  $(5.0, 2.0)$ ,  $(6.5, 0.5)$ ,  $(8.0, 2.0)$ 。在环境中存在多个静态障碍, 其中有一个非凸多边形障碍, 并且有三个障碍到目标位置的距离都在机器人安全半径内, 它们的坐标分别为  $(7.2, 2.0)$ ,  $(5.5, 0.5)$ ,  $(6.5, 4.2)$ 。各机器人的运动轨迹如图 6 所示。

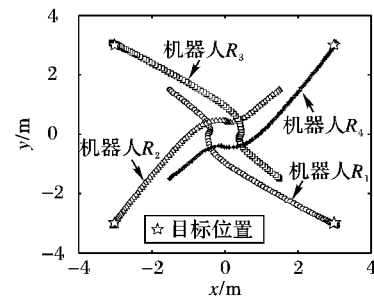


图4 各机器人的运动轨迹

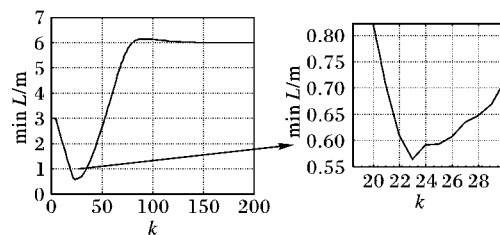


图5 各时刻各机器人之间最小距离

由图 6 可知, 在改进的人工协调场作用下, 各机器人都较为理想地避开了障碍, 最终到达目标位置, 尤其是成功抵达了

到障碍距离较近的目标点,且整个过程中机器人较好地克服了抖动和死锁现象。由实验可知,本文所述的避碰算法对非凸多边形障碍有较好的避碰效果。

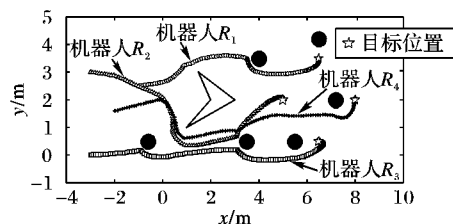


图6 在有静态障碍条件下各机器人运动轨迹

## 6 结语

本文针对多机器人系统中的避碰问题在深入研究人工协调场的基础上,提出了基于改进人工协调场的多机器人避碰算法。算法中机器人结合环境信息与自身状态,进行障碍凸化,并主动选取子目标,进而避免“死锁”现象,增强了机器人对复杂环境的适应性。同时,算法改进了传统人工势场中单纯由距离决定的排斥力模型,使排斥力由机器人当前的速度与到障碍的距离共同决定,从而较好地克服了人工协调场对空间利用率低的问题,尤其是目标点与障碍物距离较近机器人无法抵达的情况。

最后通过仿真实验证明该算法的有效性。容易知,该算法在地面车辆协同运输、多智能体协同搬运、无人机编队、自主水下装置以及航天器编队等问题中也可得到广泛的应用。

### 参考文献:

- [1] 陈立彬, 尤波. 基于改进人工势场法的机器人动态追踪与避障[J]. 控制理论与应用, 2007, 26(4): 8-10.
- [2] KIM D H, WANG H O, YE G H, *et al.* Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions: analytical design guidelines [C]// CDC 2004: Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 159-164.
- [3] 赵东, 郑时雄. 基于广义势场的多机器人避碰算法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 124-127.
- [4] 景兴建, 王越超, 谈大龙. 人工协调场及其在动态不确定环境下机器人运动规划中的应用[J]. 中国科学: E 辑, 2004, 34(9): 1022-1024.
- [5] 景兴建, 王越超, 谈大龙. 基于人工协调场的多移动机器人实时协调避碰规划[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 757-764.
- [6] 付帅, 刘淑华, 张之雅, 等. 基于改进人工协调场的多机器人运动编队[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2010, 28(2): 153-157.
- [7] URAKUBO T, OKUMA K, TADA Y. Feedback control of a two wheeled mobile robot with obstacle avoidance using potential functions [C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2004: 2428-2433.
- [8] 杨甜甜, 苏治宝, 刘进, 等. 多移动机器人避障编队控制[J]. 计算机仿真, 2011, 28(9): 215-218.
- [9] BENNET D J, McINNES C R. Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(3): 256-264.
- [10] 胡志华, 樊晓平. 基于改进人工势场力的机器人路径规划[J]. 微计算机信息, 2009, 25(8): 178-179.
- [11] 王芳, 万磊, 徐玉如, 等. 基于改进人工势场的水下机器人路径规划[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 184-188.
- [12] JARADAT M, GARIBEH M H, FEILAT E A. Dynamic motion planning for autonomous mobile robot using fuzzy potential field [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Mechatronics and Its Applications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [13] JARADAT M, GARIBEH M H, FEILAT E A. Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field [J]. Soft Computing, 2011, 16(1): 153-164.
- [14] 于振中, 闫继宏, 赵杰, 等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(1): 50-55.
- [15] 李书杰, 王鹏, 陈宗海. 基于灰色定性理论的无陷阱人工势场[J]. 控制与决策, 2013, 28(6): 879-884.
- [5] 陈洋, 赵新刚, 韩建达. 移动机器人3维路径规划方法综述[J]. 机器人, 2010, 32(4): 568-576.
- [6] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 961-967.
- [7] 朱庆保. 复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁算法[J]. 自动化学报, 2006, 32(6): 586-593.
- [8] SOUHILA A, ABDELHAFID O, KADDA M. Optimizing motion planning for hyper dynamic manipulator[J]. Journal of Electrical Engineering, 2012, 63(1): 21-27.
- [9] WANG W, YU C, SUN K. An experimental method to calibrate the robotic grinding tool [C]// ICAL 2008: IEEE International Conference on Automation and Logistics. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 2460-2465.
- [10] REN X, KUHNENKOTTER B. Real-time simulation and visualization of robotic belt grinding processes [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(11/12): 1090-1099.
- [11] 樊晓平, 罗熊, 易晟, 等. 复杂环境下基于蚁群优化算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 166-170.
- [12] 朱庆保, 张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J]. 机器人, 2005, 27(2): 132-136.
- [13] DORIGO M, STUTZLE T. 蚁群优化[M]. 张军, 胡晓敏, 罗旭耀, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2007: 12-38.
- [14] 刘传领, 杨静宇. 一种基于量子染色体变异的移动机器人路径规划融合算法[J]. 信息与控制, 2011, 40(5): 594-599.
- [15] ZHANG Y, ZHANG L, ZHANG X H. Mobile robot path planning based on the hybrid genetic algorithm in unknown environment [C]// ISDA'08: Proceedings of the Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 661-665.
- [16] SUGIHARA K, SMITH J. Genetic algorithm for adaptive motion planning of an autonomous mobile robot [C]// CIRA'97: Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1997: 138-143.
- [17] KWANG E L, JI H K. Genetic algorithm for delivery problem [J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2009, 9(2): 248-251.

(上接第3113页)