

# 一种改进的多智能体碰撞避免行为\*

李 猛<sup>1</sup>, 梁加红<sup>1</sup>, 李石磊<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;  
2. 海军工程大学 信息安全系, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:**针对目前碰撞避免行为缺乏真实性和通用性的问题,本文提出一种改进的多智能体碰撞避免行为生成方法。通过引入角色参数和个性参数,使得智能体能够根据自身的属性调整避碰行为。改进的多智能体碰撞避免行为把碰撞避免行为与真实人的属性相联系,可以保持智能体前后运动的一致性和平滑性。因此,更符合真实人的碰撞避免行为特性,具有更强的“类人性”和通用性。仿真结果表明,加入了真实人属性的改进方法产生的避碰行为能有效地应用于具有多样化属性的虚拟人群行为仿真、多机器人系统和多智能体领域中。

**关键词:**多智能体系统;碰撞避免行为;速度障碍;最优互惠碰撞避免速度

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0092-07

## An improved collision avoidance behavior of multiple agents

LI Meng<sup>1</sup>, LIANG Jiahong<sup>1</sup>, LI Shilei<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Department of Information Security, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** An improved collision avoidance behavior of multi-agents was presented due to the fact that the existing methods do not conform to the reality and are devoid of universality. By introducing the role and personality parameters, the agents adjust their collision avoidance behaviors. The improved method constructs a link between collision avoidance behaviors and the attributes of real humans. In this way, the consistency and smoothness of humans' motion is retained. So it fits in with the real humans' collision avoidance behavior more tightly. Also it is more hominine and universal than the existing methods. Simulation tests show that the improved collision avoidance behavior accords with the characteristics of the real people. So it can be used in virtual crowd simulation, multi-robot system and multi-agent system more efficiently.

**Key words:** multi-agent system; collision avoidance behavior; velocity obstacles; optimal reciprocally collision avoiding

多智能体碰撞避免行为是虚拟人群行为仿真、多机器人系统、多智能体领域、计算机图形学、虚拟现实领域中的一个最基本的问题<sup>[1-3]</sup>。在虚拟人群行为仿真领域,其可以被定义为多个虚拟人智能体在向目标移动的过程中通过感知和一系列动作保证自身不与环境中的障碍和移动实体发生碰撞的行为模式<sup>[4-6]</sup>。因此,“类人性”和通用性是对多智能体碰撞避免行为的本质要求。

与智能体和障碍物之间的碰撞避免算法不同,当考虑多智能体间的碰撞避免时,由于智能体是具有决策能力的智能实体,问题变得更为复杂:每个智能体均把对方作为具有一定“智力”的移动障碍来处理,会产生摆动效应(Oscillations)<sup>[4-6]</sup>。Jur van den Berg把此问题称为“*n*体碰撞避免(*n*-body Collision Avoidance)”,其认为必须在碰撞避

免算法中考虑其他智能体的反应特性。为了减小摆动效应, Jur van den Berg, Stephen J. Guy, Ming Lin 和 Dinesh Manocha 提出一种基于速度障碍 VO (Velocity Obstacles) 的多智能体碰撞避免行为方法,其提出的方法能够同时为具有不同目标的多个智能体产生行动,保证智能体间不会发生碰撞<sup>[4-6]</sup>。其中 VO 根据其他智能体的信息计算,每个智能体在 VO 区域之外选择自身的速度以避免与其他智能体发生碰撞;并进一步提出了互惠速度障碍 RCA (Reciprocal Collision Avoidance) 和最优互惠碰撞避免 ORCA (Optimal Reciprocally Collision Avoiding) 的碰撞避免行为<sup>[4-6]</sup>。但 Jur van den Berg 等提出的方法在碰撞避免行为中未考虑智能体的属性对避碰行为的影响,缺乏真实性且不具有通用性,限制了其在虚拟人群行为仿

\* 收稿日期:2012-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170160)

作者简介:李猛(1985—),男,安徽阜阳人,博士研究生,E-mail:mengshuqin1984@163.com;

梁加红(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:liangjiahong@nudt.edu.cn

真等领域的应用。另外由于虚拟人个体是具有真实人个性的化身 (avatar), 因此为了生成更为真实的碰撞避免行为, 必须考虑虚拟人的属性 (角色和个性参数) 对避碰行为的影响<sup>[7-10]</sup>。

基于此, 本文对 Jur van den Berg 等提出的碰撞避免行为进行了扩展, 提出了一种改进的碰撞避免行为方法。在改进的方法中, 智能体的角色参数影响智能体改变其当前速度来避碰的意愿强度, 如: 年长的人、领导者或具有一定社会地位的人相比于年轻人、社会地位稍低的人更不愿改变当前的速度以避碰; 个性参数决定了智能体在“尽可能地接近期望速度”和“选择最优避碰速度以最大限度减弱摆动效应”二者之间的平衡策略。改进方法能够保持智能体前后运动的一致性和平滑性, 因此改进方法能够用于具有多样化属性的虚拟人群行为仿真中, 而未改进的方法则不能。仿真实验结果表明: 改进方法通过在避碰行为中加入智能体的角色和个性参数, 可以比 Jur van den Berg 等提出的方法生成更为真实的避碰行为, 增强了避碰行为的“类人性”和通用性。

### 1 问题描述

仿真的环境为 2D 空间, 虚拟人智能体为圆形, 是完全 (Holonomic) 的, 即可以任意改变其方向。因此智能体的运动完全由二维速度向量决定。

假设仿真环境中存在  $n$  个智能体, 第  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 个智能体 (记为  $A_i$ ) 的信息为其当前的位置  $p_i$  (圆形的中心位置)、当前的速度  $v_i$ 、智能体的半径  $r_i$ , 并假设智能体的这些信息能够被其他智能体通过感知获得。另外每个智能体有其自身的目标位置  $p_i^{goal}$ 、最大速度限制  $v_i^{max}$ 、最大加速度限制  $a_i^{max}$  和当前情况下的偏爱速度  $v_i^{pref}$ 。 $v_i^{pref}$  是指智能体在没有其他智能体和障碍阻碍情况下的速度,  $v_i^{pref}$  的方向取为  $\overrightarrow{p_i p_i^{goal}}$ , 即智能体当前位置至目标的连线方向;  $\|v_i^{pref}\|$  取智能体最偏爱的速率。由于每个智能体的目标仅自身或高层控制可见, 因此  $v_i^{max}$ 、 $a_i^{max}$ 、 $p_i^{goal}$ 、 $v_i^{pref}$  不能被其他智能体观测到。智能体属性 (角色参数和个性参数) 也不能被其他智能体观察到, 在仿真开始时统一设置且可以被实时修改。

碰撞避免行为的任务是: 每个智能体对处于其感知范围内的其他智能体做出反应: 为自身选择一个新的速度  $v_i^{new}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , 使得所有智能体满足 (1)  $v_i^{max}$  和  $a_i^{max}$  的限制; (2) 在预先设置的时间间隔  $T$  内, 智能体与智能体之间、智能体与障碍物之间不发生碰撞; (3) 每个智能体选择  $v_i^{new}$

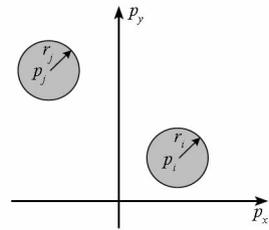
时, 应在“尽可能地接近  $v_i^{pref}$ ”和“选择最优避碰速度以最大限度减弱摆动效应”二者之间做出平衡。此为多智能体碰撞避免问题。

### 2 二体 RCA 速度的计算

首先考虑仅有两个智能体的避碰行为, 即  $n = 2$  的情况。对任意的两个智能体 (如第  $i$  个智能体和第  $j$  个智能体,  $i, j = 1, \dots, n, i \neq j$ ), 速度障碍  $VO_{ij}^T$  被定义成: 从当前时刻开始, 在时间  $T$  内会导致  $A_i$  和  $A_j$  发生碰撞的  $A_i$  相对于  $A_j$  的所有相对速度的集合 (如图 1 所示)<sup>[5-7]</sup>。

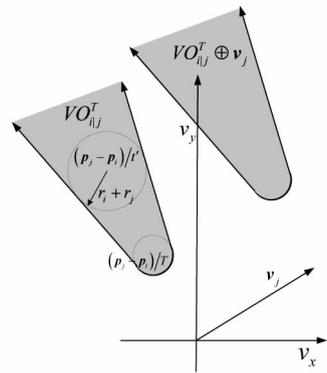
$$VO_{ij}^T = \{v \mid \exists t' \in [0, T] : t'v \in D(p_j - p_i, r_i + r_j)\} \quad (1)$$

其中,  $D(p_j - p_i, r_i + r_j)$  表示以  $p_j - p_i$  为圆心, 以  $r_i + r_j$  为半径的圆形区域的开集, 即  $D(p_j - p_i, r_i + r_j) = \{p \mid \|p_j - p_i - p\| < r_i + r_j\}$ , 因此  $VO_{ij}^T$  和  $VO_{ji}^T$  相对于坐标原点对称。



(a) 智能体  $A_i$  和  $A_j$  的位置

(a) Positions of  $A_i$  and  $A_j$



(b)  $VO_{ij}^T$  和  $VO_{ij}^T \oplus v_j$

(b)  $VO_{ij}^T$  and  $VO_{ij}^T \oplus v_j$

图 1 速度障碍示意图

Fig. 1 Sketch of velocity obstacles

式 (1) 意味着如果  $v_i - v_j \in VO_{ij}^T$  或等价的  $v_j - v_i \in VO_{ji}^T$ , 则智能体  $A_i$  和  $A_j$  会在  $t \sim t + T$  时间内发生碰撞。因此如果  $A_j$  的当前速度  $v_j$  在  $t \sim t + T$  时间内不变, 则  $A_i$  不会与其发生碰撞的速度集合 (称为 CA (Collision Avoidance) 速度) 为  $VO_{ij}^T \oplus v_j$  (如图 1) 的补集<sup>[5-7]</sup>, 即

$$CA_{ij}^T(v_j) = \{v \mid v \notin VO_{ij}^T \oplus v_j\}$$

$$i, j = 1, \dots, n, i \neq j \quad (2)$$

考虑环境中静态障碍  $\mathcal{O}$  对  $A_i$  的影响, (2) 式需修改为

$$CA_{ij}^T(v_j) = \{v | v \notin VO_{ij}^T \oplus v_j\} \cup \{v | v \notin VO_{i|\mathcal{O}}^T \oplus 0\} \quad (3)$$

其中  $VO_{i|\mathcal{O}}^T = \{\exists t' \in [0, T] : v | t'v \in \mathcal{O} - D(p_i, r_i)\}$ 。

根据(3)式, 智能体  $A_i$  新的避碰速度  $v_i^{new}$  从  $CA_{ij}^T(v_j)$  中选取; 同样地, 智能体  $A_j$  新的避碰速度  $v_j^{new}$  从  $CA_{ji}^T(v_i)$  中选取。但利用(3)式进行避碰的缺点在于: 在改变当前智能体的速度时假设其他智能体的速度不变, 但由于每个智能体都采取类似的碰撞避免策略: 即都在不断地根据其他智能体的速度来计算自身新的速度。因此会导致智能体  $A_i$  和  $A_j$  出现摆动效应。

根据式(2)、(3), 如果  $v_i^{new} \subseteq CA_{ij}^T(v_j)$  并且  $v_j^{new} \subseteq CA_{ji}^T(v_i)$ ,  $A_i$  和  $A_j$  称为互惠碰撞避免 RCA 速度。如果  $v_i = CA_{ij}^T(v_j)$  且  $v_j = CA_{ji}^T(v_i)$ , 则称为最大互惠, 此时  $v_i$  称为最优互惠碰撞避免速度  $ORCA_{ij}^T$ ,  $v_j$  称为最优互惠碰撞避免速度  $ORCA_{ji}^T$ 。

### 3 基于 ORCA 速度的改进二体碰撞避免行为

为了最大限度减小摆动效应和引入智能体的角色、个性参数, 首先定义向量

$$u = \left( \arg \min_{v \in \partial VO_{ij}^T} (\|v - (v_i - v_j)\|) \right) - (v_i - v_j) \quad (4)$$

$u$  表示从  $(v_i - v_j)$  至  $VO_{ij}^T$  的边界最近的向量,  $n$  表示  $u$  的单位向量。如图 2 所示。

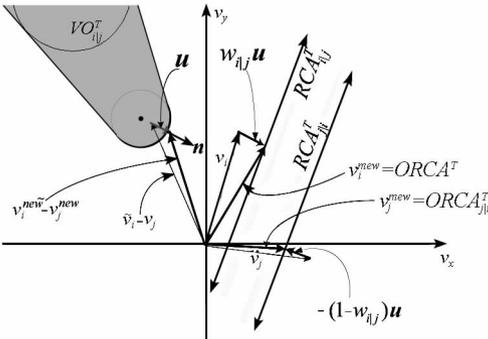


图 2  $RCA_{ij}^T(v_j)$ 、 $ORCA_{ij}^T$  示意图

Fig. 2 Sketch of  $RCA_{ij}^T(v_j)$  and  $ORCA_{ij}^T$

在图 2 中,  $w_{ij} \in [0, 1]$  为智能体  $A_i$  相对于  $A_j$  的角色参数, 表示智能体  $A_i$  相对于  $A_j$  的速度变化权重;  $(1 - w_{ij})$  为  $A_j$  相对于  $A_i$  的速度变化权重。速度变化权重  $w_{ij}$  体现了智能体对改变其自身速度的意愿强度:  $w_{ij}$  越大, 表示与  $A_j$  相比,  $A_i$

在避碰过程中更愿意改变其当前的速度; 反之, 表示  $A_i$  不情愿对自身的速度作出调整。如: 年长的人、领导者、具有一定社会地位的人相比于年轻人、社会地位稍低的人更不愿改变当前的速度, 因此  $w_{ij}$  可以设置为  $< 0.3$ 。引入  $w_{ij}$  的优势在于:  $A_i$  和  $A_j$  可以互相“商定”不同的权重, 从而可保持智能体前后运动的一致性和平滑性。且当  $w_{ij} = 0.5$  时得到的二体 RCA 速度等于 Jur van den Berg 方法得到的二体 RCA 速度, 因此 Jur van den Berg 提出的方法可以看成是改进方法的特例。从图 2 可以看出, 为了使智能体  $A_i$  和  $A_j$  的相对速度  $(v_i - v_j) \notin VO_{ij}^T$ ,  $(v_i - v_j)$  的改变量最小为  $u$ 。根据图 2:

$$RCA_{ij}^T = \{v | (v - (v_i + w_{ij}u)) \cdot n \geq 0\} \quad (5)$$

$$RCA_{ji}^T = \{v | (v - (v_j - (1 - w_{ij})u)) \cdot n \leq 0\} \quad (6)$$

根据(5)、(6)式,  $v_i^{new}$  从  $RCA_{ij}^T(v_j)$  中选取; 同样地,  $v_j^{new}$  从  $RCA_{ji}^T(v_i)$  中选取。其中, ORCA 是 RCA 集合边界上的一个元素。ORCA 的计算如下 (如图 2 所示):

$$ORCA_{ij}^T = \arg \min_{v \in RCA_{ij}^T} (\|v - v_i\|) = v_i + w_{ij}u \quad (7)$$

$$ORCA_{ji}^T = \arg \min_{v \in RCA_{ji}^T} (\|v - v_j\|) = v_j - (1 - w_{ij})u \quad (8)$$

式(7)、(8)中“最优”体现在  $(v_i - v_j)$  的改变量最小, 因此引起的智能体  $A_i$  和  $A_j$  的摆动效应最小, 即根据式(7)、(8)可以看出  $(ORCA_{ij}^T - ORCA_{ji}^T) - (v_i - v_j) = u$ 。根据(7)、(8)式, 最优的避碰速度为  $v_i^{new} = ORCA_{ij}^T$ ,  $v_j^{new} = ORCA_{ji}^T$ , 在选择最终的避碰速度时, 还必须考虑  $v_i^{pref}$ 、 $v_i^{max}$ 、 $a_i^{max}$  对  $v_i^{new}$  的约束。

### 4 基于改进算法的多体碰撞避免行为

为了解决  $n$  体碰撞避免问题, 可把上节提出的改进二体避碰行为加上  $v_i^{pref}$ 、 $v_i^{max}$ 、 $a_i^{max}$  的约束应用于  $n \geq 2$  的情况。解决多体避碰问题的关键在于: (1) 设置符合真实情况的个性参数和角色参数值; (2) 计算当前智能体  $i$  的避碰速度集合  $RCA_i^T$ , 此集合为当前智能体与所有处于其感知范围内的其他智能体  $j$  之间的互惠速度  $RCA_{ij}^T$  的交集, 即  $RCA_i^T = \bigcap_{j=1, \dots, m} RCA_{ij}^T$ ; (3) 相比于二体算法, 多体算法的复杂性来源于实时计算当前智能体的速度  $v_i$  至  $RCA_i^T$  的最小距离。基于改进算法的多智能体避碰行为如算法 1。

算法1 基于改进算法的多智能体( $n \geq 2$ )碰撞避免

Algorithm 1 Collision avoidance of multi-agents based on improved algorithm

1)  $t=0$ ;2)  $i=1$ ;引入个性参数  $\alpha_i \in [0,1]$ ,表示智能体  $A_i$  选择新的避碰速度时,与“尽可能地接近  $v_i^{pref}$ ”相比,“选择最优避碰速度”的权重。设置  $\alpha_i$  的值和  $w_{ij}$   $j \neq i$  的值;3) 第  $i$  个智能体获得处于其感知范围内的其他智能体(假设有  $m$  个)的信息:当前速度、位置、半径;4) 基于感知信息,计算当前智能体和每个处于其感知范围内的其他智能体之间的  $RCA_{ij}^T$   $j=1, \dots, m$  且  $j \neq i$ 。当前智能体的避碰速度集合为  $RCA_i^T = \bigcap_{j=1, \dots, m} RCA_{ij}^T$ 。(a) 如果  $RCA_i^T \neq \Phi$ :考虑最大速度  $v_i^{\max}$  的限制:

$$RCA_i^T = \bigcap_{j=1, \dots, m} (RCA_{ij}^T) \cap D(0, v_i^{\max}) \quad (9)$$

类似于(7)、(8)式,  $ORCA_i^T$  取为  $RCA_i^T$  离  $v_i$  最近的速度:

$$ORCA_i^T = \arg \min_{v \in RCA_i^T} (\|v - v_i\|) \quad (10)$$

考虑  $v_i^{pref}$  的影响,得

$$v_i^{new} = \alpha_i \cdot ORCA_i^T + (1 - \alpha_i) \cdot \arg \min_{v \in RCA_i^T} (\|v - v_i^{pref}\|) \quad (11)$$

 $\arg \min_{v \in RCA_i^T} (\|v - v_i^{pref}\|)$  表示  $RCA_i^T$  集合中离  $v_i^{pref}$  最近的速度。(11)式体现了智能体  $A_i$  选择新的速度时,通过调整 $\alpha_i$  的值在“选择最优避碰速度”和“尽可能地接近  $v_i^{pref}$ ”二者之间做出调整。考虑  $a_i^{\max}$  的限制:如果  $v_i^{new} > v_i + a_i^{\max} \cdot T \cdot \frac{v_i^{new} - v_i}{\|v_i^{new} - v_i\|}$ , 则  $v_i^{new} = v_i + a_i^{\max} \cdot T \cdot \frac{v_i^{new} - v_i}{\|v_i^{new} - v_i\|}$ 。(b) 如果  $RCA_i^T = \Phi$ :  $v_i^{new} = 0$ ,即当前智能体选择等待行为。5) 如果  $i=n$ ,则  $t=t+T$ ,转入第2)步;否则  $i=i+1$ ,转入第3)步。

算法的复杂度分析:由于算法1不需要存储任何大型的数据,因此主要对算法1的时间复杂度进行分析。算法1的时间复杂度主要来源于式(10)和式(11)中求  $v_i$  和  $v_i^{pref}$  至多边形区域  $RCA_i^T$  的最小距离。根据杨春成<sup>[11]</sup>等提出的求解两简单多边形间的最小距离的方法,此方法的时间复杂度为  $O(n_1 n_2)$ ,  $n_1, n_2$  分别为两多边形的定点数。式(10)、(11)都看成是计算一个点至凸边形的最小距离,其复杂度都为  $O(m)$ 。由于每次处于当前智能体感知范围内的智能体个数不大于  $n-1$ ,因此  $RCA_i^T$  的最大顶点数为  $n-1$ 。另外算法1中迭代次数为  $n$ 。因此在每个仿真步长  $T$  内,算法1在最坏情况下的时间复杂度为  $O(n^2)$ ,与对数组进行排序的各种简单算法的复杂度一致。

## 5 仿真实验及结果分析

由于智能体在虚拟人群中的角色参数  $w_{ij}$  和个性参数  $\alpha_i$  对碰撞避免行为有极大的影响,因此本文设定不同的  $w_{ij}$  和  $\alpha_i$  值进行仿真实验。这两个参数的设置根据实际生活经验获得。公共仿真参数设置为:智能体的半径  $r_i$  取相同的值  $r_i =$

0.4m,  $T=0.5$ s,感知范围设为100m。为了与Jur van den Berg提出的方法相比较,首先对两智能体的碰撞避免行为进行分析,最后对多智能体的碰撞避免行为进行仿真分析。

5.1 两智能体的碰撞避免行为( $n=2$ )

仿真环境为边长为40m的正方形区域,智能体的初始速度和  $v_i^{pref}$  ( $i=1,2$ ) 的方向设置为初始位置与目标位置的连线方向(如图3(a)中的对角线方向),初始速度和  $v_i^{pref}$  的大小设置为  $\|v_1\| = \|v_1^{pref}\| = \|v_2\| = \|v_2^{pref}\| = 1.2$ m/s。

(I) 相同个性相同角色智能体之间的碰撞避免(Jur van den Berg方法)

参数作如下设置:  $v_i^{\max} = 5$ m/s,  $a_i^{\max} = 0.05$ m/s<sup>2</sup>,  $\alpha_i = 0.5$  ( $i=1,2$ );  $w_{112} = 0.5$ 。智能体的避碰路径如图3(b)。

(II) 相同角色不同个性智能体之间的碰撞避免

参数作如下设置:  $v_i^{\max} = 5$ m/s,  $a_i^{\max} = 0.05$ m/s<sup>2</sup> ( $i=1,2$ );  $w_{112} = 0.5$ ;  $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.8$ 。智能体的避碰路径如图3(c)。

(III) 相同个性不同角色智能体之间的碰撞

避免

参数设置作如下考虑:与智能体 2 相比,智能体 1 最大速度、最大加速度较小,更不情愿对当前的速度做出改变,更倾向于“尽可能地接近偏爱速度”。因而设置:

$$v_1^{\max} = 5\text{m/s}, v_2^{\max} = 7\text{m/s}; a_1^{\max} = 0.05\text{m/s}^2, a_2^{\max} = 0.085\text{m/s}^2; \alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.4; w_{112} = 0.35。$$

(I)、(II)、(III) 三个仿真实验中的智能体的避碰路径如图 3 (d);  $\|v_1^{new}\|$ 、 $\|v_2^{new}\|$  如图 4 所示;  $\|ORCA_{112}^T\|$ 、 $\|ORCA_{211}^T\|$  如图 5 所示。

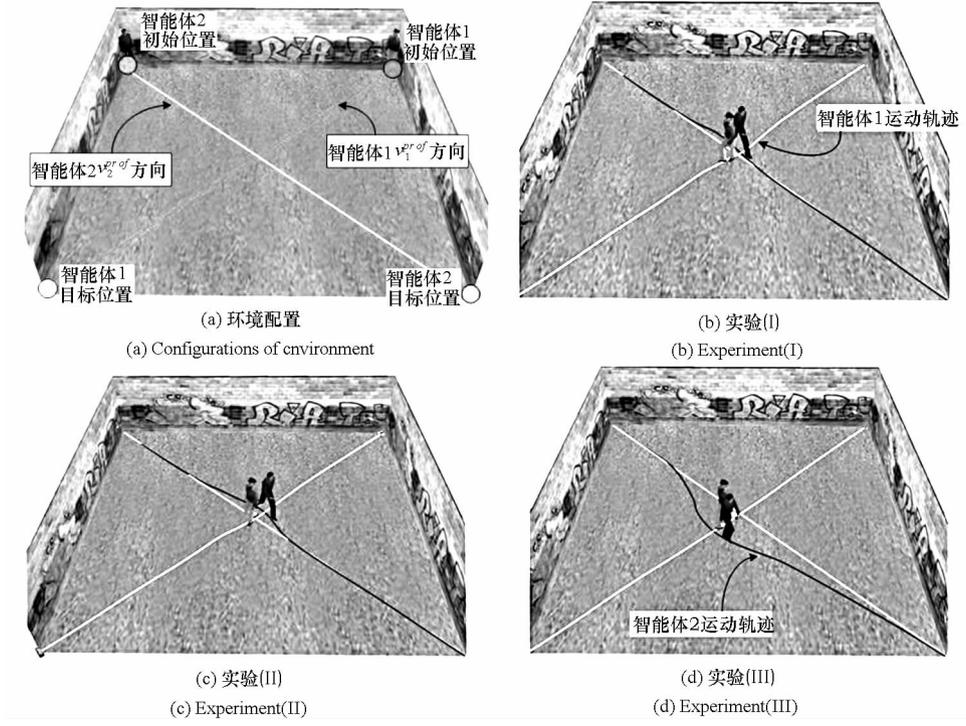


图 3 两智能体的碰撞避免路径

Fig. 3 Collision avoidance paths of agent 1 and agent 2

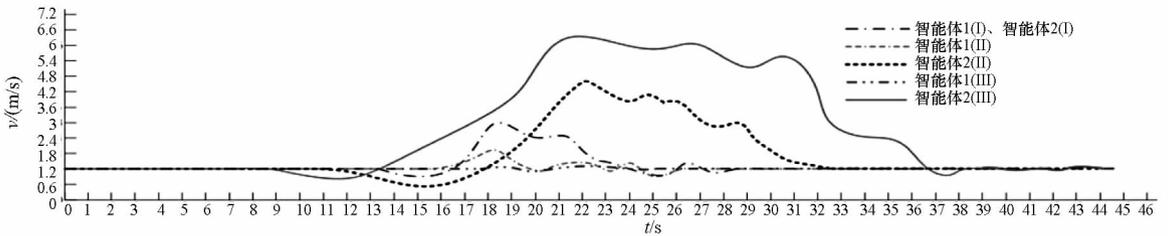


图 4 (I)、(II)、(III) 实验中的  $\|v_1^{new}\|$ 、 $\|v_2^{new}\|$

Fig. 4  $\|v_1^{new}\|$  and  $\|v_2^{new}\|$  in experiment (I), (II), (III)

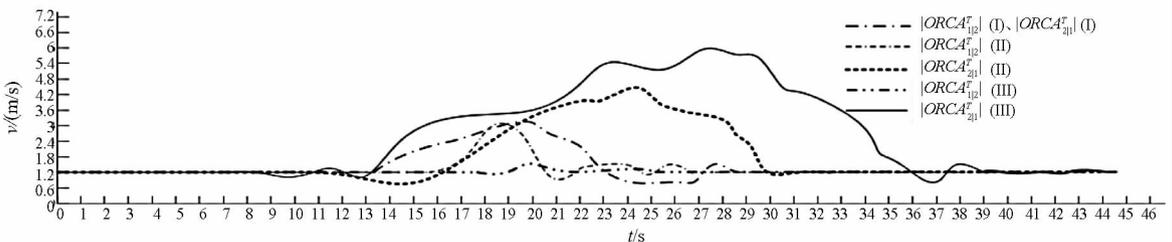


图 5 (I)、(II)、(III) 实验中的  $\|ORCA_{112}^T\|$ 、 $\|ORCA_{211}^T\|$

Fig. 5  $ORCA_{112}^T$  and in experiment (I), (II), (III)

### 5.2 多智能体的碰撞避免行为 ( $n > 2$ )

首先对  $n = 8$  的情况进行实验分析:仿真环境为半径等于 40m 具有静态障碍的圆形区域,智能体的初始速度和  $v_i^{pref}$  ( $i = 1, 8$ ) 的方向设置为初

始位置与目标位置的连线方向(如图 6 (a) 中的半径方向)。初始速度和  $v_i^{pref}$  的大小同样设置为  $1.2\text{m/s}$ ;  $v_i^{\max}$ 、 $a_i^{\max}$ 、 $\alpha_i$ 、 $w_{i,j}$  分别设置为  $[4 \sim 8]\text{m/s}$ 、 $[0.05 \sim 0.08]\text{m/s}^2$ 、 $[0.3 \sim 0.7]$ 、 $[0.2 \sim 0.75]$

之间的随机值。仿真结果如图6所示。增加智能体的数目继续进行仿真实验(参数设置与  $n = 8$  时

相同),算法1运行时间与智能体数目的关系如图7所示。

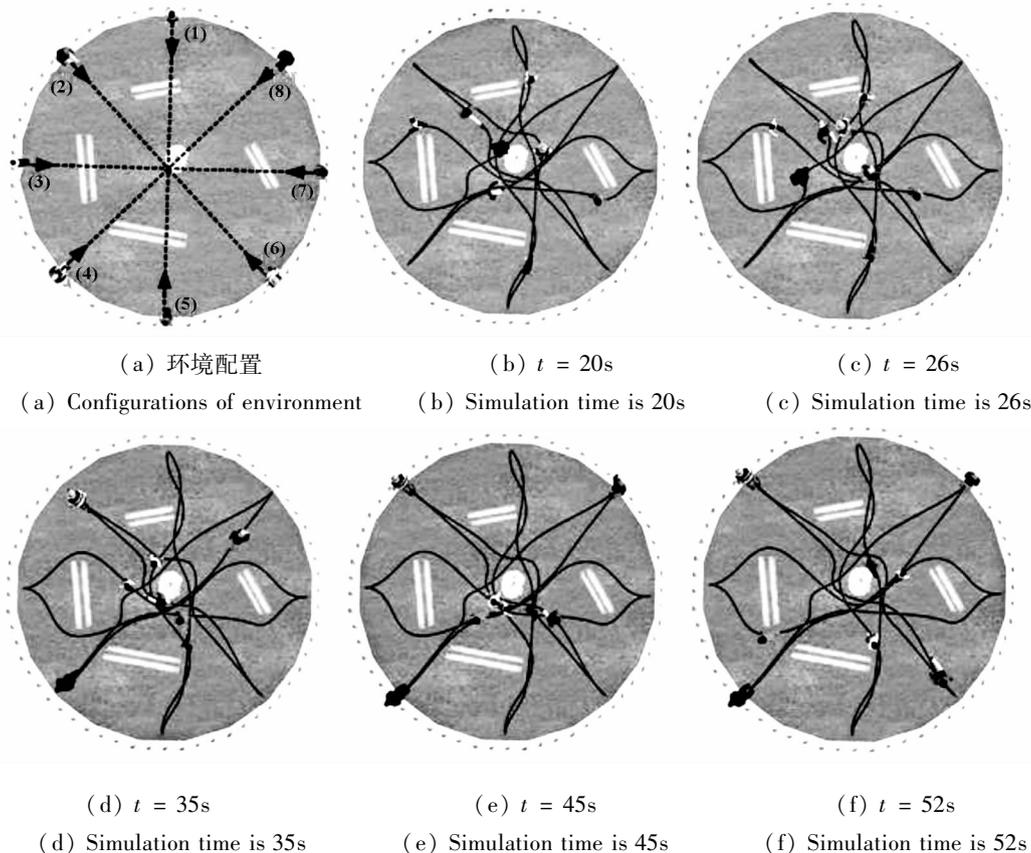


图6 多智能体碰撞避免行为及避碰路径( $n = 8$ )

Fig. 6 The collision avoidance behaviors and paths of multi-agents ( $n = 8$ )

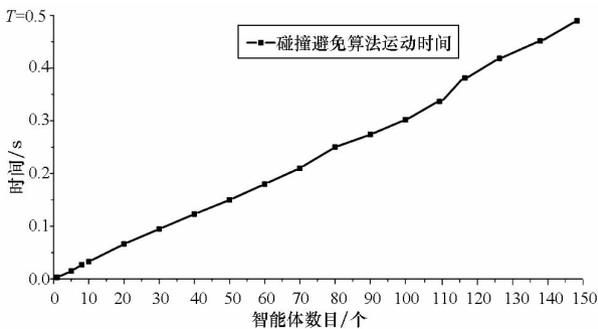


图7 不同智能体数目下的算法运行时间

Fig.7 Runtime of improved algorithm at various numbers of agents

从图3中可以看出:在图3(b)中,智能体1和智能体2避碰路径偏离对角线(初始位置与目标位置的连线)的程度相同;图3(c)中智能体2比智能体1偏离的程度大;图3(c)中,智能体1的路径偏离几乎为零,而智能体2具有很大的偏离量。由于其最大速度、最大加速度和  $\alpha_i$  值比较大,因此其选择的避碰策略是“从智能体1的前面快速通过”。图4、5也验证了如上结果。因此,实验(I)、(II)、(III)的仿真结果说明: $\alpha_i$  越大

的智能体更倾向于“选择最优避碰速度”; $\alpha_i$  越小的智能体更倾向于“尽可能地接近偏爱速度”; $w_{ij}$  越小,第  $i$  个智能体越不“情愿”对当前的速度做出改变,因此第  $j$  个智能体为了不与第  $i$  个智能体碰撞,必须做出更大的速度变化,即对碰撞避免行为的“贡献”更大。实验(I)说明 Jur van den Berg 提出的碰撞避免方法可以看成是本文提出的改进方法的特殊形式。从图6、7可以看出:本文提出的改进方法为多智能体的避碰提供了有效的碰撞避免行为,算法1的运行时间与智能体的数目基本呈线性关系;仿真步长  $T=0.5s$  时能同时满足150个智能体的碰撞避免需求,且通过分析可知, $T$  越大,算法1的运行时间越短,因此基本满足了改进的避碰方法在虚拟人群中的应用需求。

### 6 结论

本文在 Jur van den Berg 等研究的基础上,在碰撞避免行为中引入虚拟人角色参数和个性参数,提出一种基于改进算法的多智能体碰撞避免行为生成方法。这些参数把真实人的属性和智能体改变当前速度、选择最优速度和期望速度的策

略相联系,更好地保持智能体前后运动的一致性和平滑性,并可以根据智能体的属性实时调整碰撞避免策略,为生成更“类人”的碰撞避免行为奠定了基础,因此具有更强的真实性和通用性。仿真结果表明,基于改进算法的多智能体避碰行为可以作为虚拟人群行为仿真、多机器人系统、多智能体领域中一种有效的碰撞避免策略。同时在本文中,如何根据实际的生活经验对个性参数和角色参数取值,以及这些参数如何随真实人属性的变化问题值得进一步研究。

**参考文献 (References)**

[1] Thalmann D, Raupp Musse S. Crowd simulation [M]. London:Springer, 2007.

[2] Pelechano N, Allbeck J, Badler N, et al. Virtual crowds: methods, simulation, and control [M]. California: Morgan&Claypool Publishers, 2008.

[3] Lamarche F, Donikian S. Crowd of virtual humans: a new approach for real time navigation in complex and structured environments[C]//Computer Graphics Forum, 2004, 23: 509 - 518.

[4] Guy S J, Chhugani J, Kim C, et al. Clearpath: highly parallel collision avoidance for multi-agent simulation [C]//Symposium on Computer Animation. ACM, 2009.

[5] van den Berg J, Guy S J, Lin M, et al. Reciprocal n-body collision avoidance[C] //International Symposium on Robotics

Research, Springer, 2009; 241 - 248.

[6] van den Berg J, Lin M, Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, 2008; 1928 - 1935.

[7] Fulgenzi C, Spalanzani A, Laugier C. Dynamic obstacle avoidance in uncertain environment combining PVOs and occupancy grid [C] //Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2007; 1610 - 1616.

[8] Foudil C, Noureddine D. Collision avoidance in crowd simulation with priority rules [J]. European Journal of Scientific Research, 2006, 15(1): 6 - 17.

[9] Sud A, Andersen E, Curtis S, et al. Real-time path planning for virtual agents in dynamic environments[C] //Proceedings of IEEE VR, 2007, 91 - 98.

[10] 尹全军, 秦龙, 陈伟, 等. 灾害应急响应建模与仿真[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(1): 43 - 47.  
YIN Quanjun, QIN Long, CHEN Wei, et al. Disaster emergency response modeling and simulation [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(1): 43 - 47. (in Chinese)

[11] 杨春成, 张清浦, 田向春, 等. 顾及几何形状相似性的简单多边形最近距离计算方法[J]. 测绘学报, 2004, 32(4): 311 - 318.  
YANG Chuncheng, ZHANG Qingpu, TIAN Xiangchun, et al. A closest distance computation method for simple polygons considering geometry shape similarity[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 32(4): 311 - 318. (in Chinese)