

CGF 队形形成及避障行为研究*

黄珏, 秦龙, 尹全军, 查亚兵

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 计算机生成兵力 (CGF) 在模拟战术级兵力仿真时, 多个兵力实体要按照一定的队形行进。首先对基本队形的分布式控制方法进行分析; 然后, 将 leader-follower 算法思想应用其中, 简化了算法模型; 其次, 为了满足底层仿真的需要, 对兵力实体的避障行为进行了研究, 引入了切线避障法。增加 follower 与 leader 之间的距离对 leader 速度的反馈, 在 follower 避障过程中, 动态地改变 leader 的速度, 避免掉队现象。实验表明, 该方法能很好地适用于底层战术级仿真模型。

关键词: 计算机生成兵力; 队形; 避障; 掉队; 战术级仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)12-4466-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.015

Research on formation form and obstacle avoidance of CGF groups

HUANG Jue, QIN Long, YIN Quan-jun, ZHA Ya-bing

(School of Mechatronics & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: When using CGF to simulate the tactical level simulation of forces, forces entity must form a desired formation to move in most cases. For this case, this paper analysed a decentralized approach first. And on this basis, it used leader-follower approach, that simplified the algorithm model. Second, in order to satisfy the simulation of bottom forces, it needed to design a method of obstacle avoidance. Here it used tangential line to avoid the obstacle. As for the improvement, the feedback to the leader's velocity, which came from the distance between the follower and the leader, was added to the model. When the follower was avoiding obstacles, the velocity of the leader would be changed dynamicly. The phenomenon of straggling has been avoided. The experiment indicates that this model can be appropriate for the model of bottom tactical level simulation of forces well.

Key words: computer generated forces (CGF); formation; obstacle avoidance; straggling; tactical level simulation

0 引言

作战仿真中, 机动是底层兵力模型最基本的行为, 是完成复杂任务的基础。由于单个兵力的感知范围及完成任务的能力有限, 有必要形成团体 CGF 通过协调合作来完成复杂的任务。团体 CGF 在完成复杂任务的过程中, 必须要保持一定的队形行进, 以便能更好地相互合作、相互通信。同时, 团体 CGF 能够充分获取当前的环境信息、增强单个实体的进攻及防御能力。在构建逼真的底层战术分队的模拟仿真中, 对团体 CGF 的队形控制研究是非常有必要的。

目前研究队形控制的算法主要有基于行为法、领导—跟随者 (leader-follower) 法、虚结构 (virtual structure) 法、基于图论法、人工势场法以及模型预测控制法^[1]。基于行为的方法将 agent 的行进分为向目标行进、避障、维持队形等行为, 每一时刻根据当前环境选择自身行为计算出控制变量来控制 agent 的行进。领导—跟随者方法是选取一个 agent 作为整个团队的 leader, 其余的 agent 作为 follower 与 leader 保持一定的方向和距离跟随 leader 行进。这样, 就将队形控制问题转换为 follower 与 leader 之间的相对位置的控制问题, 控制器的设计比较简便。虚结构法将团队 CGF 看做是一个刚体的结构, 每个

agent 则是刚体结构上的一点, 当 CGF 行进时, 每个 agent 跟随刚体上对应的点即可。基于图论法利用几何图形来描述队形, 图的顶点表示单个 agent, 边表示各个 agent 之间的相互关系, 然后利用图论和控制理论的相关知识, 使队形收敛到目标状态。人工势场法^[2]将物理学中的势场应用到队形控制中, 人为地定义目标点及障碍物的势场, agent 在复合势场中按照物理规律行进, 最终达到目标点即势能最小的点。模型预测控制法利用有限的信息, 充分考虑动态环境的变化和过程中的不确定性, 对控制结果进行反复优化, 最终达到理想的控制效果。这种方法计算量较大, 在实时控制中还有待于进一步的研究。

本文针对作战仿真复杂环境的特殊性, 首先对基本队形机动的离散化方法进行分析, 将 leader-follower 算法思想应用其中, 用 PD 控制器来控制单个实体的运动以及队形的形成。将实体的行进过程进行行为分析, 运用基于行为的方法。在避障行为中, 采用切线避障法, 并根据当前的速度方向选择从障碍物的哪个方向的切线行进。Follower 避障时, 将自身的避障信息反馈给 leader, leader 根据需要对自身速度大小进行调整, 避免 follower 与 leader 之间距离太远从而产生掉队现象。模型仿真实验验证了队形收敛、保持和避障等功能, 最后对仿真结果进行分析, 该算法能很好地满足实际系统的需要。

收稿日期: 2012-04-14; **修回日期:** 2012-05-28 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (60904055); 国家部委基金资助项目 (513040102, 9140A04010110KG0110)

作者简介: 黄珏 (1988-), 男 (土家族), 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要研究方向为作战模拟 (nudt_huangjue@163.com); 秦龙 (1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为作战模拟; 尹全军, 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为行为建模; 查亚兵, 男, 教授, 博士, 主要研究方向为建模与仿真系统 VV&A。

1 基于 leader-follower 的 CGF 队形形成及避障方法

1.1 基本队形分析

根据模拟战场环境的需要,针对三个实体的团队进行队形需求分析,设计了横队、纵队、斜面以及三角四类队形,如图 1 所示。

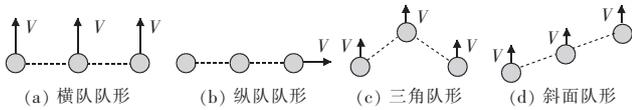


图 1 四类队形

对上述四种队形,利用 leader-follower 法,将其中的一个 agent 看做是 leader,其余两个作为 follower,leader 与 follower 的关系可以用向量 $Z = (lx, ly)$ 或 $Z = (\varphi, l)$ 来表示。其中: lx, ly 分别表示 leader 与 follower 横纵坐标之差, φ 表示 leader、follower 的连线与速度方向的夹角。

1.2 队形的表示方法

在团队 CGF 行进中,通常使用图来表示编队,图的顶点表示各个 agent,图的边表示各 agent 之间的关系,本文利用矩阵来描述团队 CGF 的队形,采用 $Z = (lx, ly)$ 来描述 agent 之间的关系,那么队形的数据结构可表示为

$$\begin{pmatrix} L_1 & l_{1,x} & l_{1,y} \\ L_2 & l_{2,x} & l_{2,y} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_n & l_{n,x} & l_{n,y} \end{pmatrix}$$

如图 2 所示。

如图 1 所示三角队形可表示为

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ L & l_{1,x} & l_{1,y} \\ L & l_{2,x} & l_{2,y} \end{pmatrix}$$

1.3 形成控制的算法

考虑 agent 的如下动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_x \\ \dot{y} = v_y \\ \dot{v}_x = u_1 \\ \dot{v}_y = u_2 \end{cases} \quad (1)$$

$Z = (x, y)^T$ 表示 agent 当前的位置, $V = (v_x, v_y)^T$ 表示 agent 当前的速度, $U = (u_1, u_2)^T$ 表示控制输入量。式(1)可简单地表示为

$$\dot{Z} = U \quad (2)$$

基于 leader-follower 思想并结合基于行为的方法,将 agent 分为 leader 和 follower 分别进行控制,leader 的行为可以分为向目标行进和避障,follower 的行为可以分为形成队形、维持队形和避障。

1.3.1 Leader 向目标行进

$$V = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} V_{\text{value}} \quad (3)$$

其中: θ 表示目标点的偏角, V_{value} 表示速度大小。

1.3.2 Follower 队形的形成及维持

对于式(3)所示的二阶系统模型,agent i 与 leader 的期望位置差为

$$\Delta Z_{i,l,d} = Z_{i,d} - Z_{l,d} = \begin{bmatrix} l_{i,x} \\ l_{i,y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

在某一时刻,agent i 与 leader 的位置差为

$$\Delta Z_{i,l} = Z_i - Z_l \quad (5)$$

那么,agent i 在队形中产生的队形误差为

$$E_i = \Delta Z_i - \Delta Z_{i,d} \quad (6)$$

在选择控制器时,必须使 E_i 渐进趋向于 0,才能得到期望的队形,所以可以选择如下控制器

$$U_i = -k_i \times (\Delta Z_i - \Delta Z_{i,d}) - d_f \times \dot{Z}_i \quad (7)$$

其中: $k_i > 0, d_f > 0$ 。由 MATLAB 仿真可知,该控制器能使系统较快地收敛到目标状态。取 $k_i = 7, d_f = 1, \Delta Z_{i,d} = 10$, follower 跟随 leader 横坐标的仿真曲线如图 3 所示。

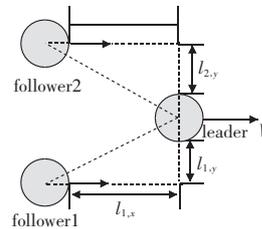


图 2 队形的图表示

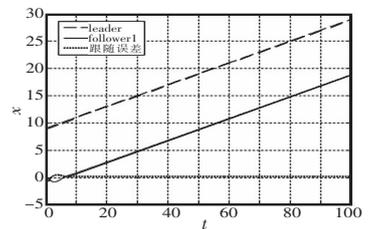


图 3 Follower 跟随 leader 横坐标的仿真曲线

1.3.3 Agent 避障方法

Agent 在移动过程中遇到障碍时,要采取避障行动。因为在水平面上,大多数的障碍都可以用椭圆来近似,所以本文中引入切线避障法。切线避障是根据几何学中切线与角的关系来确定 agent 下一时刻的运动方向,当 agent 成功避开障碍物后,需要重新选择下一步的行为。

如图 4 所示,当 $\theta_1 \leq \theta_2$ 时,agent 从左边避障,当 $\theta_1 > \theta_2$ 时,agent 从右边避障。 α 为避障的可调参数。

可以得出左边避障的速度为

$$V_{\text{avoid-obstacle}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \alpha) & -\sin(\theta_1 + \alpha) \\ \sin(\theta_1 + \alpha) & \cos(\theta_1 + \alpha) \end{bmatrix} \cdot V \quad (8)$$

右边避障的速度为

$$V_{\text{avoid-obstacle}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \alpha) & -\sin(\theta_2 + \alpha) \\ \sin(\theta_2 + \alpha) & \cos(\theta_2 + \alpha) \end{bmatrix} \cdot V \quad (9)$$

为了防止掉队的现象,在已有的控制算法基础上,本文增加了 follower 行为信息对 leader 的反馈。当 follower 选择避障行为时,将自身的避障信息反馈给 leader,leader 根据需要对自身速度大小进行调整,以适应整体队形的需要,避免在 follower 避障时,与 leader 速度相差过大,follower 避障结束时,与 leader 的距离太远,从而产生掉队的现象。Leader 调整后的速度大小为

$$\dot{V}_{\text{leader}} = -kg \times (\max\{Z_{l,x} - Z_{i,x} - l_{i,x}\}) - ki \times V_{\text{leader}} \quad (10)$$

其中: kg 为调节参数, $Z_{l,x} - Z_{i,x}$ 为 leader 与 agent i 之间的距离在 leader 的速度方向上投影的大小。

2 仿真实验及结果分析

2.1 队形形成

以纵队形为例,环境中无障碍的情况,队形数据中, $l_{1,x} = 20, l_{2,x} = 40, l_{1,y} = l_{2,y} = 0$ 。仿真运行结果如图 5 所示。

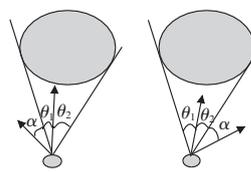


图 4 避障示意图

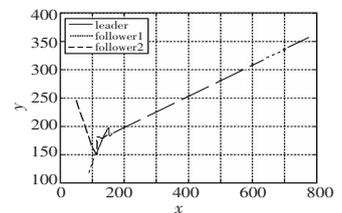


图 5 leader-follower 位置变化

X、Y 方向相对误差如图 6、7 所示。

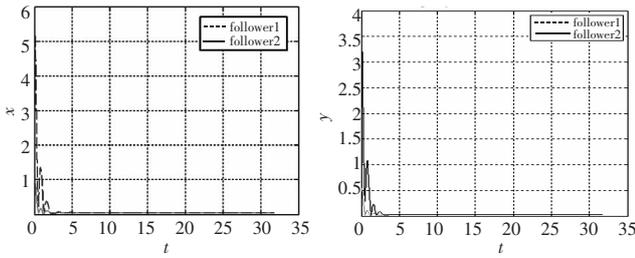


图 6 Agent x 方向上位置相对误差 图 7 Agent y 方向上位置相对误差

由上面的仿真结果可以看出,该队形能在较短时间内($t = 2\text{ s}$)达到预期的队形,在形成队形之后,能够维持队形运行,稳定时 X 坐标相对误差为 4.977%, Y 坐标相对误差为 5.188%。

2.2 避障机动过程

以三角队形为例,队形数据中 $l_{1,x} = l_{2,x} = 20, l_{1,y} = -30, l_{2,y} = 30$ 。仿真结果如图 8~11 所示。

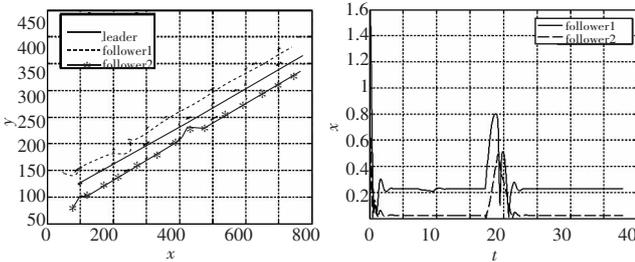


图 8 Leader-follower 位置变化 图 9 Agent x 方向上位置相对误差

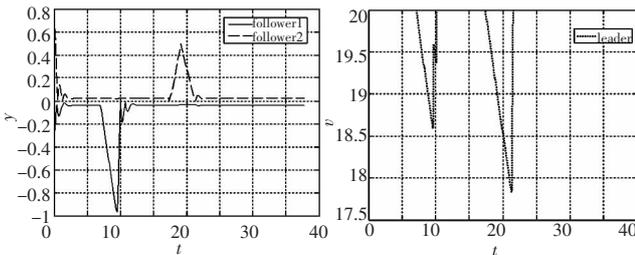


图 10 Agent y 方向上位置相对误差

图 11 避障时 leader 速度大小变化

由仿真实验可以看出,agent 能够及时躲避障碍,在避障过程中,由于在目标方向上 leader 与 follower 之间距离增大,为了防止掉队的现象,leader 会相应地降低自身的速度,避障结束之后,又能较快地恢复到以前的队形。

3 结束语

本文通过对已有的一种基本队形的控制方法进行改进,将 leader-follower 算法思想应用其中,并结合基于行为的方法,在其中加入避障行为。为了防止掉队现象,增加了 follower 状态对 leader 的反馈,使 leader 能够根据当前 follower 与自身的状态来动态地改变自身的属性,以确保系统能够稳定地运行。最后对改进后的队形收敛及避障行为进行了仿真实验验证和分析。

在实验中发现,在采取避障行为之后,队形中 follower 的位置误差会增加,而 leader 速度的改变不平滑。在下一步的工作中需要对这两个问题进行研究,使其能更加适应战术仿真的需要。

参考文献:

- [1] 任德华,卢桂章. 对队形控制的思考[J]. 控制与决策,2005,20(6):601-604.
- [2] LAWTON J R, YOUNG B J, BEARD R W. A decentralized approach to elementary formation maneuvers[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics & Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000:2728-2733.
- [3] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. Int J of Robotics Research,1986,5(1):90-98.
- [4] LUO Xiao-yuan, HAN Na-ni, GUAN Xin-ping. Leader-following consensus protocols for formation control of multi-agent network[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2011,22(6):991-997.
- [5] HENGSTER-MOVRI C K, BOGDAN S, DRAGANJAC I. Multi-agent formation control based on bell-shaped potential functions[J]. Intell Robot System,2011,58(2):165-189.
- [6] 李强,刘国栋. 多移动机器人的队形控制[J]. 计算机系统应用,2011,20(4):80-85.
- [7] 李强,刘国栋. 基于行为的机器人自适应队形控制[J]. 计算机系统应用,2011,20(4):177-181.
- [8] 宋艳萍,王兴平,张术东,等. 基于势函数的护卫队形控制[J]. 海军航空工程学院学报,2011,26(6):622-627.
- [9] 刘新科,李大鹏,谭乐祖,等. 基于制导与控制一体化的导弹编队队形控制[J]. 火力与指挥控制,2011,36(8):208-210.
- [10] 张峰,王金超,陈雪波. 机器人队形控制中的二叉树方法[J]. 辽宁科技大学学报,2010,33(5):456-459.
- [11] 黄天云,王晓楠,陈雪波. 基于队形控制的多机器人时间最优搬运方法[J]. 系统仿真学报,2010,22(6):1442-1446,1465.
- [12] 李波,王祥凤. 基于动态 leader 多机器人队形控制[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2009,30(2):210-214.

(上接第 4462 页)

- [4] 曾宇容,王林,富庆亮. 基于 DE 和 PSO 的混合智能算法及其在模糊 EOQ 模型中的应用[J]. 计算机应用研究,2012,29(2):438-441.
- [5] LØVBJERG M, RASMUSSEN T K, KRINK T. Hybrid particle swarm optimizer with breeding and subpopulations[C]//Proc of International Conference on Genetic and Evolutionary Computation Conference. San Francisco; Morgan Kaufmann, 2001:101-106.
- [6] XIE Xiao-fang, ZHANG Wen-jun, YANG Zhi-lian. A dissipative particle swarm optimization[C]//Proc of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. [S. l.]:IEEE Press, 2002:1456-1461.
- [7] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S K, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004,8(3):240-255.
- [8] 赫然,王永吉,王青,等. 一种改进的自适应逃逸微粒群算法及实验分析[J]. 软件学报,2005,16(12):2036-2044.

- [9] 马瑞新,刘宇,覃征,等. 求解约束优化问题的动量粒子群算法[J]. 系统仿真学报,2010,22(11):2485-2488.
- [10] MICHALEWICZ Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs[M]. Berlin:Springer,1996:117-119.
- [11] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. Boston:Addison-Wesley,1989:212-214.
- [12] DEB K, AGRAWAL R B. Simulated binary crossover for continuous search space[J]. Complex Systems,1995,9(4):115-148.
- [13] KRINK T, VESTERSTRON J S, RIGET J. Particle swarm optimization with spatial particle extension[C]//Proc of Congress on Evolutionary Computation. Washington DC:IEEE Computer Society,2002:1474-1479.
- [14] SHI Yu-hui, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C]//Proc of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. [S. l.]:IEEE Press,1998:69-73.
- [15] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、算法与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:105-107.