

文章编号: 1001-0920(2008)08-0953-04

群集系统的软控制

潘福臣^{1,2}, 陈雪波³, 李琳⁴

(1. 大连理工大学 电子与信息学院, 辽宁 大连 116024; 2. 东北财经大学 津桥商学院, 辽宁 大连 116600;
3. 辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114044; 4. 大连广播电视大学 理工系, 辽宁 大连 116021)

摘要: 考虑欧氏空间中群集动态系统的“软控制”问题, 即在不改变群集系统中个体间现有规则的条件下, 通过增加一个或多个可控智能体干扰群集个体的行为, 使群集中心转移到期望的位置. 给出了可控智能体的控制规则, 并利用粒子群(PSO)算法讨论了群集系统软控制的最优收敛问题. 实例研究表明了“软控制”在群集系统中的可行性.

关键词: 群集; 软控制; 可控智能体; PSO 算法

中图分类号: O231.2

文献标识码: A

Soft control of swarms system

PAN Fu-chen^{1,2}, CHEN Xue-bo³, LI Lin⁴

(1. School of Electronics and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Kingbridge Business College, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116600, China; 3. School of Information Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114044, China; 4. Department of Technology, Dalian Radio and TV University, Dalian 116021, China. Correspondent: PAN Fu-chen, E-mail: fuchenpan2004@sina.com.cn)

Abstract: Considering the collective dynamics of a group of mobile autonomous agents moving in Euclidean space with “soft control”, which keeps the local rule of the existing agents in the system. The collective behavior of the group is interve by increasing one or more controlled intelligent agents. A control law for intelligent agents that can be controlled randomly is provided so that it can synchronize the swarm center to an expect position and discuss the optimization of convergence time by particle swarm optimization (PSO) algorithm for several intelligent agents. A case study shows the feasibility of soft control.

Key words: Swarms; Soft control; Controlled intelligent agent; PSO algorithm

1 引言

群集现象在自然界中广泛存在, 如飞鸟在空中的聚集, 鱼群在水中的游动等. 群集本质上是一种从自然界中获取灵感的仿生学方法. 各种物质群自然地组织与运动, 在运动中达到整体上的动态稳定, 各形式不同的群体运动, 在广义上都是一种群集行为. 群由数目不定的个体组成. 在群中, 个体与个体之间的相对运动, 以及群整体在外界环境中的宏观运动, 都来源于“势场”中的吸引力和排斥力. “势场”可以是真实的物理引力/斥力场, 亦可以是数学意义上的虚拟力场——人工势能函数. “势场”的不同选择造就了群集行为的多样性. 群集现象有利于群体部落适应环境, 更好地生存和发展. 近年来, 国内外

众多学者对各类群集现象作了广泛深入的研究, 并取得了令人满意的成果^[1-4]. 群集行为的研究已成为复杂系统中一个重要的前沿课题之一.

2 群集的软控制

群集行为的研究大致可分为 3 类^[5]:

- 1) 给定个体的局部演化规则, 讨论整个系统的群集行为;
- 2) 给出整个系统的群集行为, 如何设计个体的局部规则;
- 3) 给出个体的局部演化规则, 如何控制整个群集系统.

第 3 类问题是由中国科学院系统研究所韩靖等^[6]提出的, 并称之为群集的“软控制”. 即在不破坏

收稿日期: 2007-05-19; 修回日期: 2007-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574010).

作者简介: 潘福臣(1977—), 男, 辽宁锦州人, 博士生, 从事复杂系统、智能控制的研究; 陈雪波(1960—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、群集智能等研究.

群集个体局部规则的前提下,通过外界干预群集个体,达到控制整个群集系统的目的.韩靖等对Boid模型引入了“软控制”策略,并进行了模拟研究,结果表明了“软控制”在群集行为中的可行性.

“软控制”的最大特点是在不破坏群体现有规则的前提下控制整个系统.由于群集系统是一个多个个体系统,增加一个或几个个体不会影响整个系统的性质.因而可通过增加可控个体的方法来干预系统,使系统向着预定的目标演化.

3 一类群集模型的软控制

在 n 维欧式空间中,考虑具有 M 个个体的群集系统.这里将群集个体视为空间中的点,第 i 个个体的位置记作 $x^i \in R^n$,对于第 i 个个体,其运动方程为^[7]

$$\dot{x}^i = \sum_{j=1, j \neq i}^M g(x^i - x^j), \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

其中 $g(\cdot)$ 代表个体 i 与个体 j 之间相互吸引和排斥的关系, $g(\cdot)$ 连续可微且 $g(0) = 0$.

式(1)表明,个体 i 的运动状态,是由所有其他个体对其吸引和排斥关系的总和所决定的.其中

$$g(x^i - x^j) = - (x^i - x^j) \left(a - b \exp\left(-\frac{|x^i - x^j|^2}{c}\right) \right); \quad (2)$$

a, b, c 是正常数,且 $b > a$; $|x^i - x^j| = \sqrt{(x^i - x^j)^T (x^i - x^j)}$ 是范数;参数 a 代表吸引关系; $b \exp\left(-\frac{|x^i - x^j|^2}{c}\right)$ 代表排斥关系.该函数给出了群集个体之间小距离排斥,大距离吸引的关系.

定义 1^[7] 称 $\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x^i$ 为群集中心.

因 $\dot{\bar{x}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M g(x^i - x^j) = 0$, 故群集中心是静止的.

Gazi 等^[7] 讨论了模型(1)的稳定性问题,并在文献[8]中对(1)作了进一步讨论.模型(1)是对群体行为的简单模拟,这种简化有利于数学上的分析.

本文主要考虑在不改变群集个体的局部规则的前提下,如何将整个系统的中心引导到期望的位置.这种群集中心的转移对于人群的疏散和城市中心的转移有着实际的指导意义.

3.1 一个可控智能体的群集软控制

考虑在群集中增加一个可控智能个体(该智能体的位置可随意控制),其位置记为 $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in R^n$.可控智能体与其他个体在外观上没有什么区别,也即群集中的个体将可控智能体视为群集中心的一个普通个体,唯一不同的是,可控智能体的

位置可随意控制.

在没有任务时,可控智能体与群集中的普通个体没有任何区别,而当接到指令后,可控智能体将采取相应的策略干扰群集中的普通个体,以达到控制群集中心的目的.

为了有效地转移群集中心,对可控智能体采取如下的控制策略:

$$\dot{x}^0 = (M+1)x^e - M\bar{x}_M, \quad (3)$$

其中: x^e 为期望的群集中心位置, $\bar{x}_M = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x^i$ 为群集中心(不包括可控智能体).

加入可控智能体后,系统(1)可写成

$$\dot{x}^i = \sum_{j=1, j \neq i}^M g(x^i - x^j), \quad i = 0, 1, \dots, M. \quad (4)$$

定理 1 对于任意初始状态的群集个体,可控智能体采用式(3)的控制规则,系统(1)的中心将转移到期望位置 x^e .

证明 考虑具有一个可控智能体的群集系统(4),未加入可控智能体前, M 个个体的群集中心为

$\bar{x}_M = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x^i$; 加入可控智能体后, $M+1$ 个群集个体的中心为

$$\begin{aligned} \bar{x}_{M+1} &= \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M x^i = \frac{1}{M+1} (x^0 + \sum_{i=1}^M x^i) = \\ &= \frac{1}{M+1} (x^0 + M\bar{x}_M) = \\ &= \frac{1}{M+1} ((M+1)x^e - M\bar{x}_M + M\bar{x}_M) = \\ &= \frac{1}{M+1} (M+1)x^e = x^e. \end{aligned}$$

定理 1 表明,采用软控制规则(3),通过增加一个可控智能体来干扰系统,可以达到控制群集中心的目的,即可以引导群集在空间的任意位置聚集.同时也看到,新的群集中心将保持静止,直到有新的控制目标出现.

定理 2 软控制下的群集中心是静止的.

证明 因为 $\dot{\bar{x}}_{M+1} = 0$, 所以定理成立.

3.2 多个可控智能体的群集软控制

假设可以在系统(1)中增加 s 个可控智能体,它们的初始位置分别记作 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_s^0, x_k^0 \in R^n, k = 1, 2, \dots, s$.将这 s 个智能体加入到系统(1)中,则

$$\begin{aligned} \dot{x}^i &= \sum_{j=1}^M g(x^i - x^j), \\ \dot{x}^k &= x_1^0, x_2^0, \dots, x_s^0, x^1, x^2, \dots, x^M. \end{aligned} \quad (5)$$

定理 3 存在 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_s^0$, 使得系统(1)的中心转移到期望位置 x^e .

证明 设

$$\begin{aligned} x_1^0 &= (M + s)x^e - M\bar{x}_M, \\ x_2^0 &= x_3^0 = \dots = x_s^0 = 0. \end{aligned}$$

此时

$$\begin{aligned} \bar{x}_{M+s} &= \frac{1}{M+s} \left(\sum_{i=1}^M x^i + \sum_{k=1}^s x_k^0 \right) = \\ &= \frac{1}{M+s} (x_1^0 + M\bar{x}_M) = \\ &= \frac{1}{M+s} [(M+s)x^e - M\bar{x}_M + M\bar{x}_M] = x^e. \end{aligned}$$

于是定理得证.

定理 3 表明,至少存在一个控制策略使得群集中心到达期望位置.

事实上,设 $x_2^0 = (M + s)x^e - M\bar{x}_M, x_1^0 = x_3^0 = \dots = x_s^0 = 0$, 同样能有效地控制群集中心的位置. 因此,对于多个可控智能体参与的群集软控制,其控制方案不唯一. 于是如何选择一个最佳的控制策略便成为一个有意义的问题.

由 $\bar{x}_{M+s} = \frac{1}{M+s} \left(\sum_{i=1}^M x^i + \sum_{k=1}^s x_k^0 \right) = x^e$ 可知,

$$\sum_{k=1}^s x_k^0 = (M + s)x^e - M\bar{x}_M. \quad (6)$$

定义 2 称满足式(6)的 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_s^0$ 为可行解.

定义 3 可行解的集合称为可行域.

定理 4 系统(5)在 t_0 时间内将收敛到一个超球 Q 内, 其中

$$Q = \{x^i \mid x^i - x^e \in A\},$$

$$A = \frac{b}{a} \sqrt{c/2} \exp\left(-\frac{1}{2}\right),$$

$$t_0 = \max\left\{-\frac{1}{2a} \ln \frac{A^2}{2V^i(0)}\right\},$$

$$V^i(0) = \frac{1}{2} \|x^i(0) - x^e\|^2,$$

$$x^i = x_1^0, x_2^0, \dots, x_s^0, x^1, x^2, \dots, x^M.$$

定理 4 的证明参见文献[7]定理 1 的证明,不同之处是本文增加了 s 个可控智能体,这并不影响整个证明过程.

定义 4 称 $t_0 = \max\left\{-\frac{1}{2a} \ln \frac{A^2}{2V^i(0)}\right\}$ 为收敛时间.

对于加入 s 个可控智能体的软控制,一个基本问题就是群集系统的收敛速度. 期望通过加入 s 个可控智能体既能达到预定的控制目标,也能具有较快的收敛速度.

将前面的寻找最优控制方案的问题转化成如下的非线性优化问题:

$$\min_{\{x_1^0, x_2^0, \dots, x_s^0\}} t_0 = \max\left\{-\frac{1}{2a} \ln \frac{A^2}{2V^i(0)}\right\}, \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^s x_k^0 = (M + s)x^e - M\bar{x}_M. \quad (8)$$

本文利用粒子群(PSO)算法求解上述优化问题. PSO 是一种基于群体的随机优化技术,与其他基于群体的优化算法相比,它们均初始化一组随机解,通过迭代搜索最优解. 不同的是,进化计算遵守适者生存原则,而 PSO 则是模拟社会.

设在 n 维搜索空间中有 m 个微粒,其算法为

$$V_{i+1} = wV + c_1 r_1 (p_i - x_i) + c_2 r_2 (p_g - x_i), \quad (9)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_i. \quad (10)$$

其中: $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 为第 i 个粒子的当前速度向量; $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 为第 i 个粒子的当前位置向量; $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ 为个体极值; $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ 为全局极值; v_{i+1} 为更新后粒子速度; x_{i+1} 为更新后粒子位置; w 为惯性权重; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 上的随机数; c_1, c_2 为加速常数,表示向 p_i 和 p_g 靠近的速度变化.

最小收敛时间的 PSO 算法如下:

- 1) 初始化. 给定惯性权重 w ; 加速常数 c_1, c_2 ; 粒子初始位置 x_{i0} ; 粒子初始速度 v_{i0} .
- 2) 分别计算可控智能个体的收敛时间,其最大值记为 t^* . 若 $t^* < t_0$ (t_0 为普通个体的收敛时间的最大值),则结束;否则转 3).
- 3) 按照式(9)和(10)更新粒子的位置和速度向量,重复 2) 的操作,直到 $t^* < t_0$.
- 4) 输出各个可控智能体的位置和最小收敛时间.

4 模拟研究

为了更好地表明上述软控制的效果,本文在 Matlab6.1 上进行了数值模拟. 采用二维空间作为粒子的演化空间,令 $a = 0.1, b = 0.4, c = 10$.

图 1 给出了 12 个粒子在没有任何可控智能体

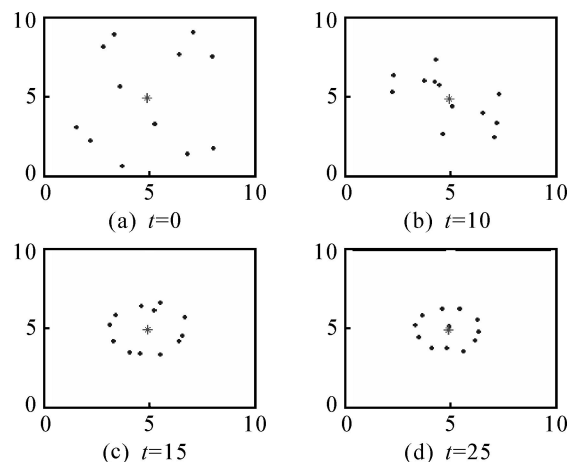


图 1 群集个体的运动

参与情况下不同时刻的运动情况,其中圆点代表12个普通个体,而星号代表群集中心.从图1可以看出,群集个体将向群集中心移动并逐步进入稳定状态.

图2表示有1个可控智能体参与的群集运动,其目的是将群集中心转移到新的位置 $x^e = (6.5, 6.5)$.其中圆点代表普通个体,星号代表没有可控智能体参与的群集中心,叉号代表期望群集中心 x^e ,箭头代表可控智能体.从图中可以看到,由于可控智能体的加入,打破了群集原有的稳定状态,促使群集重心转移到期望位置 x^e ,并重新获得了一个稳定的群集状态.

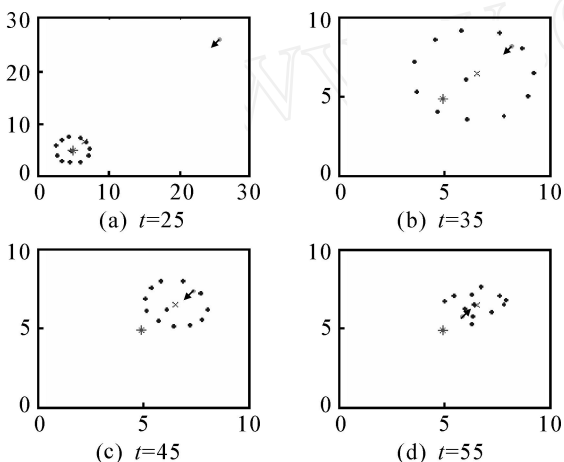


图2 有1个可控智能体的群集运动

图3为有3个可控智能体参与的情况,利用PSO算法得到最优控制.图中的符号同前.3个可控智能体的初始位置分别为 $(13, 10)$, $(14, 15)$, $(11.66, 12.73)$.很明显,对于同样的期望群集中

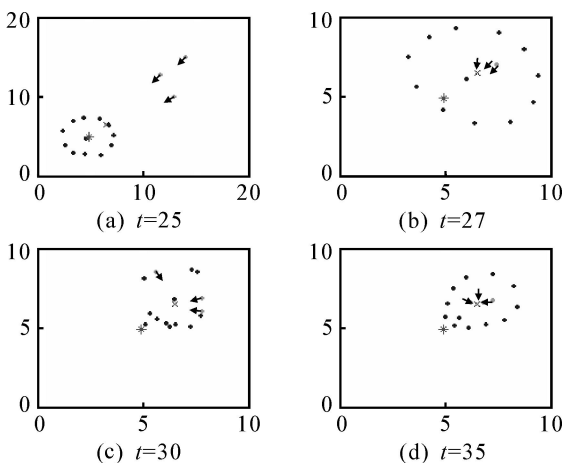


图3 有3个可控智能体的群集运动

心,有3个可控智能体参与的软控制的收敛时间要优于只有1个可控智能体的情况.

5 结 论

本文考虑了一类简单的群集模型的软控制问题,即通过增加可控智能个体的方法来控制整个群集系统的中心位置,但并不改变系统中群集个体的局部运动规则.实例证明了该方法的可行性.

群集系统的“软控制”是一个新的研究方向,还有很多问题尚待研究.如可控智能体数目的最优配置问题,即可控智能体的数目是否越多越好?过多的可控智能体是否会产生系统不稳定的问题?此外,控制手段的扩展(采用其他的方法控制系统),自适应控制问题,可控智能体的设计,随机模型的软控制,这些都将是后续研究的重点内容.“软控制”作为一种新的控制方法必将为复杂系统的研究提供更广阔的前景.

参考文献(References)

- [1] Leonard N E. Virtual leaders, artificial potential and coordinated control of groups[C]. Proc 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 2968-2973.
- [2] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic system: Algorithms and theory [J]. IEEE Trans on Automatics Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [3] Swaroop D, Hedrick J K. String stability of interconnected systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(3): 473-488.
- [4] Shaw E. Fish in schools[J]. Natual History, 1975, 84(8): 40-45.
- [5] Jing Han, Ming Li, Lei Guo. Soft control on collective behavior of a group of automamous agents by a shill agent[J]. J of Systems Science and Complexity, 2006, 19(1): 54-62.
- [6] Jing Han, Lei Guo, Ming Li. Guiding a group of Local interaction atonomous mobil agents [C]. Proc of the 24th Chinses Control Conf. Guangzhou, 2005: 184-187.
- [7] Gazi V, Passino K M. Stability analysis of swarms[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(4): 692-697.
- [8] Gazi V, Passino K M. Stability analysis of swarms in an environment with an attractant/repellent profile [C]. Proc of American Control Conf. Anchorage, 2002: 1819-1824.