СИНХРОНИЗАЦИЯ И Управление движением ансамбля мобильных агентов

Е.М. Варварин, Г.В. Осипов

Научно-образовательный математический центра “Математика технологий будущего” Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

603022 , E-mail: [varvarin@unn.r](mailto:varvarin262@gmail.com)u

В данной статье предлагаются способы реализации последовательного, параллельного и в виде заданной конфигурации ансамбля с использованием эффекта хаотической фазовой синхронизации. Показывается возможность управления движением ансамбля и определены условия надежности полученных структур.

Использование ансамбля мобильных агентов для изучения и анализа коллективной динамики в последние годы широко применяется в различных областях науки и техники [1-4]. Главным объектом большинства исследований в области коллективной динамики является синхронизация [5, 6], которая, в свою очередь, сильно зависит от топологии связей ансамбля [7, 8]. Довольно популярной у исследователей является топология связи “каждый с каждым” [9, 10], однако в реальном мире топология большинства структур не является постоянной, связи между элементами могут появляться и исчезать, усиливаться или ослабевать [11]. Системы, в которых помимо силы связи может изменяться и положение узлов, удобно рассматривать как ансамбль мобильных агентов [12-15]. Таким образом удалось рассмотреть: синхронизацию мобильных роботов [16], локализацию объектов распределённой следящей системой [17] и другие работы. В работе [18] представлены результаты управления поведением ансамбля мобильных агентов на плоскости.

В качестве мобильного агента рассмотрим точку, движущуюся в трёхмерном пространстве так, что её траектория полностью совпадает с траекторией соответствующего ей хаотического осциллятора. В данной работе, не теряя общности, рассмотрим осциллятор Рёсслера (1).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1) |

где и - положительные параметры. В последующих экспериментах примем: .

Организацию управления движением ансамбля мобильных агентов в пространстве можно разбить на два этапа:

1. Установление конфигурации агентов.
2. Выведение агентов на траекторию движения.

Для решения поставленных задач мы использовали методы: хаотической фазовой синхронизации (для задания агентам определённой конфигурации) и вынужденной синхронизацией

Целью нашего исследования является создание агентов, которые начинают взаимодействие с соседними элементами только при достаточной близости, поэтому при любой конфигурации связь между агентами и *j* будет удовлетворять условию (2):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2) |

где — параметр связи в нашем исследовании.

### Реализованные конфигурации движения роя мобильных агентов.

1. Последовательное движение агентов.

Добавим в систему (1) «притягивающую» связь по координате следующим образом:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3) |

Результаты численных экспериментов представлены на (Рис. 1).

1. Параллельное движение агентов.

Для подобного движения помимо «притягивающей» связи из предыдущего пункта, необходимо добавить «отталкивающую» связь по координате :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |

При сближении -го и -го агентов данная связь обеспечит противоположно направленные силы, что приведёт агентов к отталкиванию. Поведение элементов при данной связи проиллюстрировано на (Рис. 2).

1. Придание рою мобильных агентов структуры различных геометрических форм.

В данном разделе мы использовали определённые комбинации связей последовательного и параллельного движения для получения структур различной геометрической формы (прямоугольник, круг, треугольник и др.) Не теряя общности, рассмотрим конфигурацию типа «прямоугольник».

Для организации подобного движения введём и — число элементов в одной строке и одном столбце соответственно. Тогда для каждой отдельной строки нам нужно добавить «отталкивающую» связь. В то же время нам нужно связать строку с соседними строками «притягивающей» связью:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

где , , — первый элемент текущей строки для элемента , — остаток от деления на .

Результаты численного моделирования приведены на (Рис. 4).

### Анализ влияния нарушения межэлементных связей.

В данном эксперименте мы экспериментально рассматриваем зависимости структурной устойчивости ансамбля при удалении из него части агентов.

1. Удаление элементов из центра роя.

Путём численных экспериментов было обнаружено, что при любой структуре роя существует критическое значение числа удалённых агентов, при котором структура разбивается на несколько кластеров (Таблица 1).

1. Удаление элементов из случайных позиций.

В данном эксперименте элементы удаляются из случайных позиций. Теперь количество объединённых групп агентов зависит не только от числа удалённых элементов, но и от их позиций. Не трудно увидеть по системе (5), что при удалении целой строки агентов глобальная связь ансамбля теряется и рой разобьётся как минимум на две части - до и после удалённой строки. Результаты представлены в (Таблица 2).

### Управление роем.

Рассмотрим задачу деактивацию всех агентов и перемещение их в начало координат. Для этого помимо агентов, заданных системой (1), вводится ещё один агент, который движется по заданной траектории. В качестве такого агента возьмём осциллятор Ван-дер-Поля:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (6) |

где - малый параметр, .

Для остальных агентов возьмём уравнение (5) и добавим всем элементам связь с уравнением Ван-дер-Поля следующим образом:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (5) |

где связь работает аналогично связи , но при сближении мобильного агента с агентом, движущимся согласно уравнению Ван-дер-Поля.

Параметр подобран таким образом, чтобы в начале координат был устойчивый фокус. (Рис. 4).

В результате исследования управления коллективной динамикой роя мобильных хаотических агентов на основе осциллятора Рёсслера, получилось синхронизировать ансамбль в трёхмерном пространстве с помощью различных связей, удалось на основе этих связей объединить ансамбль агентов в более сложную пространственную структуру, было рассмотрено влияние нарушения межэлементных связей на полученную структуру. Также при помощи «внешнего» агента получилось остановить рой в окрестности начала координат. Такой способ позволит эффективно деактивировать ансамбль агентов при необходимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ #23-12-00180 (задача синхронизации) и проекта № 0729-2020-0036 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (задача управления).

1. V. L.S. Freitas, S. Yanchuk, M. Zaks, Elbert E.N. Macau, Synchronization-based symmetric circular formations of mobile agents and the generation of chaotic trajectories, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 94 (2021), 105543, ISSN 1007-5704. DOI: 10.1016/j.cnsns.2020.105543.
2. A. Barciś, C. Bettstetter, "Sandsbots: Robots That Sync and Swarm," in IEEE Access, vol. 8, pp. 218752-218764 (2020). DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3041393.
3. Ramírez-Ávila, G.M., Kurths, J., Depickère, S., Deneubourg, JL, Modeling Fireflies Synchronization. In: Macau, E. (eds) A Mathematical Modeling Approach from Nonlinear Dynamics to Complex Systems. Nonlinear Systems and Complexity, vol. 22. Springer, Cham (2019). DOI: 10.1007/978-3-319-78512-7\_8.
4. L. M. Pecora, T. L. Carroll; Synchronization of chaotic systems. Chaos (2015); 25 (9): 097611. DOI: 10.1103/PhysRevE.99.042203.
5. T. Weng, X. Chen, et al. Multiple moving agents on complex networks: From intermittent synchronization to complete synchronization, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 614, 2023, 128562, ISSN 0378-4371. DOI: 10.1016/j.physa.2023.128562.
6. A. Arenas, A. Díaz-Guilera, et al. Synchronization in complex networks, Physics Reports, vol. 469, Issue 3, (2008), pp 93-153, ISSN 0370-1573. DOI: 10.1016/j.physrep.2008.09.002.
7. Chen, L., Yang, Q., Li, C. et al. Controlling Dynamic Formations of Mobile Agents Governed by Euler-Lagrange Dynamics. Int. J. Control Autom. Syst. 19, 1740–1750 (2021). DOI: 10.1007/s12555-020-0274-3.
8. E. Shajan, D. Ghosh, et al. Direction-dependent noise-induced synchronization in mobile oscillators. Chaos (2023); 33 (5): 053108. DOI: 10.1063/5.0146983.
9. X. Ling, W. B. Ju, N. Guo, et al. Explosive synchronization in network of mobile oscillators, Physics Letters A, Volume 384, Issue 35, (2020), 126881, ISSN 0375-9601. DOI: 10.1016/j.physleta.2020.126881.
10. V.L.S. Freitas, S. Yanchuk, H.L.C. Grande, et al. The effects of time-delay and phase lags on symmetric circular formations of mobile agents. Eur. Phys. J. Spec. Top. 230, 2857–2864 (2021). DOI: 10.1140/epjs/s11734-021-00153-6.
11. C. Hu, H. He, H. Jiang, Edge-Based Adaptive Distributed Method for Synchronization of Intermittently Coupled Spatiotemporal Networks, in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 67, no. 5, pp. 2597-2604. DOI: 10.1109/TAC.2021.3088805.
12. S. Majhi, D. Ghosh, and J. Kurths, Emergence of synchronization in multiplex networks of mobile Rössler oscillators, Phys. Rev. E 99, vol. 99, 4 January 2019, 012308. DOI: 10.1103/PhysRevE.99.012308.
13. J. Zhou , G. Xiao, H Eugene, Stanley Control of mobile chaotic agents with jump-based connection adaption strategy [New Journal of Physics](https://iopscience.iop.org/journal/1367-2630),  [vol. 22](https://iopscience.iop.org/volume/1367-2630/22), [July 2020](https://iopscience.iop.org/issue/1367-2630/22/7). DOI: 10.1088/1367-2630/ab9851.
14. S. N. Chowdhury, S. Majhi and D. Ghosh, "Distance Dependent Competitive Interactions in a Frustrated Network of Mobile Agents," in IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 3159-3170, 1 Oct.-Dec. 2020. DOI: 10.1109/TNSE.2020.3017495.
15. A. Buscarino, L. Fortuna, M. Frasca, S. Frisenna, Interaction between synchronization and motion in a system of mobile agents. Chaos 1 November 2016; 26 (11): 116302. DOI: 10.1063/1.4965033.
16. F. Zhang, W. Chen and Y. Xi, Motion Synchronization in Mobile Robot Networks: Robustness, 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006, pp. 5570-5575. DOI: 10.1109/IROS.2006.282274.
17. L. Dou, C. Song, X. Wang, et al. Target localization and enclosing control for networked mobile agents with bearing measurements, Automatica, vol. 118, 2020, 109022, ISSN 0005-1098. DOI: 10.1016/j.automatica.2020.109022.

|  |  |
| --- | --- |
| а | полная синхронизацияб |

**Рис. 1.** Последовательное движение агентов. (а) - кластерная синхронизация роя, (б) - последующая глобальная синхронизация.

|  |  |
| --- | --- |
| частичная (2)а | б |

**Рис. 2.** Параллельное движение роя агентов. (а) - движение в кластерах, (б) - последующая полная синхронизация.

|  |  |
| --- | --- |
| сетка кластеры (3)а | сетка полнаяб |

**Рис. 3.** Придание рою структуры квадрата. (а) - агенты объединились в группы. (б) - агенты объединились в одну группу.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| а | б | в |

**Рис. 4.** Захват ансамбля агентом, заданным уравнением Ван-дер-Поля. (а) - состояние роя до добавления нового агента. (б) - новый элемент начал притягивать всех агентов. (в) - рой движется по траектории фокуса к состоянию равновесия агента, заданного уравнением Ван-дер-Поля. Значение параметра .

Таблица 1, Численные результаты числа кластеров от числа удалённых элементов из ансамбля, имеющего структуру квадрата 10x10 элементов. Все элементы удалялись из центра структуры.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Кол-во удалённых элементов | 4 | 8 | 12 | 16 | 24 | 32 | 36 | 44 | 52 | 60 | 64 |
| Кол-во кластеров | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 и 2 уединён-ных элемента | 3 и 1 уединённый | 4 |

Таблица 2. Численные результаты числа кластеров от числа удалённых элементов из ансамбля, имеющего структуру квадрата 10x10 элементов. Элементы удалялись случайно.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Кол-во удалённых элементов | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| Кол-во кластеров | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |