01

СИНХРОНИЗАЦИЯ И Управление движением ансамбля мобильных агентов

Е.М. Варварин, Г.В. Осипов

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

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

В данной статье предлагаются способы реализации последовательного, параллельного и в виде заданной конфигурации движения ансамбля (роя) с использованием эффекта хаотической фазовой синхронизации. Показывается возможность управления движением ансамбля и определяются условия устойчивости 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 сильно зависит от топологии связей ансамбля [7, 8]. Можно выделить три основные типа связей в ансамблях: локальная (связь с ближайшими соседями), нелокальная (связь не только с ближайшими соседями), глобальная (связь по принципу “каждый с каждым” [9, 10]. Чаще всего такие связи имеют стационарный характер, т.е. топология и сила связей не меняются во времени. 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 ансамбли 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: , параметр, характеризующий временные масштабы осцилляций -.

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

1. Установление конфигурации агентов.

Выведение агентов на траекторию движения.

Для решения поставленных задач мы использовали методы: хаотической фазовой синхронизации (для задания ансамблю агентов определённой конфигурации их расположения в трехмерном пространстве).

Целью нашего исследования является создание такого ансамбля агентов, в котором взаимодействия агентов с соседями начинаются только при их достаточной, наперед заданной близости, поэтому при любой конфигурации связь между агентами -м и j-м будет удовлетворять условию (2):

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

где — параметр связи в нашем исследовании. Таким образом агенты начинают взаимодействовать при попадании в шар радиуса .

### Реализованные конфигурации движения роя мобильных агентов.

1. Последовательное движение агентов.

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

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

Элементы постепенно объединяются в кластеры и начинают летать друг за другом «по цепочке», после чего все объединяются в один кластер. Результат численных экспериментов (полная синхронизация агентов) представлен на (Рис. 1а).

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. За счёт «отталкивающей» связи элементы начинают лететь одним рядом, параллельно друг другу. Поведение элементов при данной связи проиллюстрировано на (Рис. 1б).

1. Придание рою мобильных агентов структуры различных геометрических форм.

В данном разделе мы используем 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 параметры 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 .

С течением времени агенты синхронизируются в группы, затем объединяются в один кластер и движутся подобно иллюстрации (Рис. 1в).

### 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. В результате экспериментов на структуре 10х10 при удалении 12 элементов уже наступает разделение структуры на два кластера (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. В результате наших экспериментов при структуре 10х10 разбиение на кластеры получилось уже при удалении 45 элементов (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 отрицательный параметр, . При заданном наборе параметров система (6) имеет единственный аттрактор - устойчивое состояние равновесия в точке (0,0). Именно в эту точку должен прийти весь ансамбль. Чем меньше параметр , тем быстрее ансамбль попадает в заданную точку. Очевидно, что управляющая траектория может быть любой. Это может быть заданное регулярное или хаотическое движение.

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. В результате все агенты приходят в окрестность состояния равновесия (Рис. 2).

В результате исследования синхронизацие и управления коллективной динамикой роя мобильных хаотических агентов на основе осциллятора Рёсслера, оказалось возможным получить заданные типы движений мобильных агентов в трехмерном пространстве: последовательное – один за другим на определенном расстоянии, которым можно управлять, параллельное – «единым фронтом», в виде заданных геометрических структур. Было рассмотрено влияние количества выбиваемые агентов из ансамбля (за счет разрыва межэлементных связей) на полученную структуру. Также продемонстрировано, что при помощи «внешнего» агента возможно задать рою требуемую траекторию движения. Например, «посадить» рой в заданной точке.

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).

### Список литературы

[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.

[18] В. А. Левин, Г. В. Осипов, Письма в ЖТФ, 42 (6), 42 (2016).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| полная синхронизацияа | частичная (2)б | сетка полнаяв |

**Рис. 1.** Синхронизация ансамбля мобильных агентов. (а) - полная синхронизация при реализации последовательного движения. (б) - кластерная синхронизация роя при параллельном движении (в дальнейшем два кластера объединятся в один). (в) - придание рою структуры квадрата 5х5 элементов.

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

**Рис. 2.** 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 |