

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОЛЕКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ У РОЙОВИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МІСЦЕВОСТІ

Безродний В.В.^{1, 2}

e-mail: vladyslav.bezrodnyi@nure.ua

Науковий керівник – канд. техн. наук, доц. Єсілевський В.С.¹

Харківський національний університет радіоелектроніки,

¹ кафедра прикладної математики,

² кафедра автоматизації проектування обчислювальної техніки

м. Харків, Україна

This paper considers mathematical models of collective behavior used in swarm systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) for terrain exploration tasks. Swarm systems are characterized by decentralized control and interaction based on local rules. The work analyses several well-known models including flocking models, consensus models, the Cucker-Smale model, potential field methods and area coverage models. Mathematical formulations of these models are presented and their applicability to multiagent coordination problems is discussed. The reviewed approaches form the theoretical basis for the development of algorithms for cooperative exploration and distributed sensing using UAV swarms.

Використання груп безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для дослідження територій є перспективним напрямом розвитку автономних робототехнічних систем. Однією з ключових особливостей ройових систем є відсутність централізованого керування: поведінка всієї системи формується на основі локальних правил взаємодії між агентами. Для дослідження таких систем використовуються математичні моделі колективної поведінки.

Одним із найвідоміших підходів до моделювання колективного руху є модель flocking, запропонована К. Рейнольдсом [1]. У цій моделі поведінка кожного агента визначається правилами уникнення зіткнень, узгодження напрямку руху та підтримання згуртованості групи. Динаміка руху агента може бути описана системою рівнянь

$$\dot{x}_i = v_i, \dot{v}_i = F_{sep} + F_{align} + F_{coh},$$

де x_i – координати агента, v_i – швидкість руху, F_{sep} , F_{align} , F_{coh} – сили взаємодії між агентами.

Іншим підходом є моделі узгодження (consensus models) [2], які описують процес синхронізації станів агентів у мережі взаємодії. У таких моделях кожен агент змінює свій стан відповідно до станів сусідніх агентів. Математично це може бути описано рівнянням

$$\dot{x}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j - x_i),$$

де x_i – стан агента, N_i – множина сусідніх агентів, a_{ij} – коефіцієнти взаємодії між агентами.

У матричній формі система записується як рівняння

$$\dot{x} = -Lx,$$

де L є лапласіаном графа взаємодії.

Більш строгий математичний опис колективного руху агентів запропоновано у моделі Cucker-Smale [3]. У цій моделі швидкість кожного агента коригується відповідно до швидкостей інших агентів з урахуванням відстані між ними. Динаміка системи описується рівняннями:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= v_i, \\ \dot{v}_i &= \sum_{j=1}^N \psi(\|x_j - x_i\|)(v_j - v_i),\end{aligned}$$

де $\psi(r)$ – функція взаємодії, яка зазвичай визначається так:

$$\psi(r) = \frac{1}{(1+r^2)^\beta},$$

де r – відстань між агентами.

Для задач навігації та уникнення перешкод у багатьох робототехнічних системах застосовується метод штучних потенціальних полів (Artificial Potential Field), запропонований О. Хатібом [4]. У цьому підході рух агента описується як рух у штучному потенціальному полі:

$$\dot{x}_i = -\nabla U(x_i),$$

де U – потенціальна функція.

Зазвичай потенціальна функція включає складових у рівнянні

$$U = U_{att} + U_{rep},$$

де U_{att} відповідає за притягання до цілі, U_{rep} – відштовхування від перешкод.

Для задач дослідження та моніторингу території застосовуються алгоритми покриття області (coverage control), які забезпечують рівномірний розподіл агентів у просторі. Один із підходів базується на використанні діаграм Вороного, де кожен агент відповідає за певну область дослідження. Такий підхід детально розглянуто у роботі J. Cortés, S. Martínez та F. Bullo [5]. Рух агента може бути описаний рівнянням

$$\dot{p}_i = k(c_i - p_i),$$

де p_i – вектор швидкості i -го агента (зміна його позиції у часі); k – позитивний коефіцієнт підсилення, що визначає швидкість збіжності алгоритму; p_i – поточні координати агента в просторі; c_i – центроїд (центр мас) його комірки Вороного.

Зазначені підходи до моделювання колективної поведінки у ройових системах описують механізми узгодження руху агентів, їх взаємодію та самоорганізацію на основі локальних правил. Вони забезпечують формування узгодженої динаміки системи, стабільність групової поведінки та здатність до децентралізованої координації. Однак зазначені підходи переважно функціонують на рівні керування рухом і не враховують процесів

прийняття рішень, які є необхідними для розв'язання прикладних задач ройових систем.

До таких задач належать пошук і виявлення цілей (target search and detection), дослідження території (exploration), побудова карт середовища (mapping), моніторинг (environment monitoring), розподіл задач між агентами (task allocation) та супровід об'єктів (target tracking). Розв'язання цих задач потребує не лише узгодженого руху, але й формування стратегій поведінки, адаптації до невизначеності середовища та обробки інформації, що надходить від сенсорів.

У зв'язку з цим доцільним є введення додаткового рівня – рівня прийняття рішень (decision layer), який визначає вибір дій агентів на основі їхнього стану, локальної взаємодії та глобальної мети системи. Одним із перспективних підходів до реалізації такого рівня є використання функцій корисності (utility functions), що дозволяють формалізувати критерії ефективності та забезпечити децентралізований вибір оптимальних дій кожним агентом.

Таким чином, побудова ефективних ройових систем передбачає інтеграцію моделей колективного руху з моделями прийняття рішень, що дозволяє перейти від простої координації до цілеспрямованої поведінки. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку адаптивних механізмів прийняття рішень, зокрема із застосуванням методів машинного навчання та комп'ютерного зору, а також на дослідження їх взаємодії з класичними моделями колективної поведінки.

Список використаних джерел:

1. Reynolds C. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1987. Vol. 21, no. 4. P. 25–34. DOI: 10.1145/37402.37406.
2. Olfati-Saber R., Fax J., Murray R. Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. *Proceedings of the IEEE*. 2007. Vol. 95, no. 1. P. 215–233. DOI: 10.1109/JPROC.2006.887293.
3. Cucker F., Smale S. Emergent Behavior in Flocks. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2007. Vol. 52, no. 5. P. 852–862. DOI: 10.1109/TAC.2007.895842.
4. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*. 1986. Vol. 5, no. 1. P. 90–98. DOI: 10.1177/027836498600500106.
5. Cortés J., Martínez S., Bullo F. Coverage Control for Mobile Sensing Networks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2004. Vol. 20, no. 2. P. 243–255. DOI: 10.1109/TRA.2004.824698.