

УДК 517.977

ИНДИКАТОР ЛОКАЛЬНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА ДРОНАМИ В ГРУППЕ

Р.А. Гиргидов

Санкт-Петербургский Политехнический Университет имени Петра Великого

Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

E-mail: ruben@betria.com

В.В. Фомичев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет ВМК

Россия, 119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2-й учебный

корпус, факультет ВМК

E-mail: fomichev@cs.msu.ru

Ключевые слова: задачи управления, методы идентификации, групповое взаимодействие, дроны, анализ состояния группы, агенты.

Аннотация: В настоящей работе исследуются вопросы определения специфики взаимодействия дронов внутри группы на основании внешних наблюдений. Ставится задача определения насколько поведение группы определяется локальным взаимодействием. Предлагаются методы выявления локальности на основе информации о попарных расстояниях между дронами в группе. Проводится анализ применения предложенных методов для различного вида групп дронов.

1. Введение

При визуальном наблюдении за группой дронов при отсутствии информации об их устройстве или используемом программном обеспечении необходимо иметь «интегральные» характеристики, дающие возможность предсказывать поведение группы дронов. Одной из определяющих характеристик, влияющих на поведение группы в целом, является наличие внутри группы локальных взаимодействий. Указанная «локальность» (например, дрон «видит» только своих соседей) взаимодействия является важным признаком того, что мы имеем дело с роем, из чего, в свою очередь, могут следовать особенности поведения группы, свойственные именно рою, такие как «устойчивость» к исключению части дронов из группы или наоборот, включению в группу новых дронов [5]. Таким образом, мы предлагаем поставить следующую задачу: на основании визуальных наблюдений за группой дронов на некотором временном отрезке определить, используют ли дроны группы локальное взаимодействие.

В наших исследованиях мы рассмотрели два алгоритма, дающие необходимую

нам оценку:

- **«Наивный алгоритм».** Он заключается в определении списка соседних дронов для каждого дрона в пределах заданной окружности радиуса $r(t)$ и сравнении этих списков в различные моменты времени, исходя из предположения, что дрон внутри окружности может взаимодействовать с другими дронами, а вне ее – нет. Чем сильнее изменение состава подгрупп соседей для каждого дрона, тем меньше наблюдаемое локальное взаимодействие.
- **«Продвинутый алгоритм»** дополнительно оценивает изменение расстояния и одновременность перемещений дронов в разных частях наблюдаемой группы.

Для обоих алгоритмов требуется задать следующие параметры, определяемые из эвристических соображений:

1. Предположение о количестве соседей, с которыми в среднем взаимодействует дрон в процессе наблюдений. В дальнейшем будем обозначать (n) .
2. Величина смещения по времени δt для которой производится сравнение состояния группы.

Величина $r(t)$, в данной работе, вычисляется на основании выбранных параметров.

2. Описание методов

2.1. Наивный алгоритм

Пусть матрица расстояний $R(t) = [r_{i,j}(t)]$, где $r_{i,j}(t)$ расстояние между дроном i и дроном j в момент времени t , где $i, j = \overline{1..N}$. Рассмотрим эту матрицу в моменты времени t и δt , т.е. $R(t)$, $R(t + \delta t)$.

1. Определим среднее расстояние, на котором находятся соседи: выстроим все дроны в группе в порядке возрастания расстояния до дрона с номером (i) (проделывая это для каждого дрона в группе), $r_{i(1)} \leq r_{i(2)} \leq \dots \leq r_{i(n)}$, обратим внимание, что дроны расстояние до которых больше, чем $r_{i(n)}$ не рассматриваются в качестве соседей, где (n) – параметр метода. Среднее расстояние до ближайших соседей от дрона (i) будет иметь вид:

$$r_i^{(n)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_{i,(k)}(t)$$

Тогда среднее расстояние в группе дронов при $i = \overline{1..N}$ до (n) ближайших соседей будет.

$$\overline{r^{(n)}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^{(n)}(t)$$

Среднеквадратичное отклонение расстояния до ближайших соседей будет:

$$\sigma_r(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(r_i^{(n)}(t) - \overline{r^{(n)}}(t)\right)^2}$$

2. Зададим в момент времени (t) параметр метода $r(t)$ следующим образом:

$$r(t) = \overline{r^{(n)}}(t) + 2\sigma_r(t)$$

3. Введем матрицу попарных взаимодействий так, чтобы значения матрицы были равны единице только для тех дронов, расстояния между которыми будет меньше $r(t)$

$$(1) \quad R_r(t) = \begin{bmatrix} 1 & r_{i,j}(t) < r(t) \\ 0 & r_{i,j}(t) \geq r(t) \end{bmatrix},$$

Обратим внимание, что на каждом шаге среднее количество ненулевых элементов в столбцах матрицы $R_r(t)$ соседей будет (n) .

4. Пусть $A = R_r(t) \oplus R_r(t + \delta t)$, где \oplus – операция исключающего “ИЛИ” (т.е. XOR), примененная почленно к каждому элементу матриц.

5. Тогда количественная разница в списках будет:

$$(2) \quad k = \frac{1}{2N} \sum_{i,j=1}^N a_{i,j}$$

2.2. Продвинутый алгоритм

Для оценки локальности взаимодействия дронов друг с другом применим к матрице попарных расстояний группы метод Катхилла-Макки [1], который дает такой способ перестановки номеров дронов, что их новые номера будут стоять максимально в порядке их “близости” по взаимодействию друг с другом. Обозначим оператор преобразования индексов как SM_A .

Определение. Средняя ширина ленты матрицы – среднее арифметическое отклонения номеров не нулевых элементов матрицы попарных расстояний от главной диагонали [2].

Обозначим ее как (average bandwidth) Данная формула дана для симметричной матрицы эта величина вычисляется по формуле:

$$(3) \quad AV(B) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m(B, i) - i)$$

Исходя из наших предположений о локальности, после перенумерования, если дроны находятся рядом по расстоянию, то и номера у них будут “близки”. Применение оператора к матрице B , если дроны не меняли своего относительного положения обозначим $SM_A[B]$ также должно дать матрицу с шириной ленты близкой к минимальной.

“Сильное” изменение во времени средней ширины ленты матрицы расстояний при одинаковом способе перестановки номеров дронов покажет нам отсутствие локального взаимодействия.

Пошаговое описание продвинутого алгоритма:

Протредаем первые 3 шага так же, как и для наивного алгоритма. В результате получим матрицу попарных взаимодействий (1)

4. Обозначим как $CM_{R_r(t)}$ оператор преобразования индексов для матрицы $R_r(t)$ с помощью метода Катхилла-Макки (см. выше). Тогда полученная в результате преобразования матрица будет:

$$R_r^*(t) = CM_{R_r(t)} [R_r(t)]$$

5. Средняя ширина ленты, определенная по формуле (3)

$$K(t) = AV(R_r^*) = AV(CM_{R_r(t)} [R_r(t)])$$

6. Исходя из предположения о локальности взаимодействия мы можем рассмотреть ширину ленты K , полученную для матрицы расстояний в момент времени $t + \delta t$ на основании способа перенумерации узлов для предыдущего момента времени:

$$\bar{K}(t + \delta t) = AV(CM_{R_r(t)} [R_r(t + \delta t)])$$

Эта величина может отличаться от средней ширины ленты

$$K(t + \delta t) = AV(CM_{R_r(t+\delta t)} [R_r(t + \delta t)])$$

полученной на основании нового преобразования в момент времени $t + \delta t$,

7. Вычисляем разность, которая и будет характеризовать степень локального взаимодействия дронов:

$$(4) \quad |K(t + \delta t) - \bar{K}(t + \delta t)|$$

Для случая локального взаимодействия разность должна быть меньше единицы.

3. Экспериментальная проверка работоспособности предложенных алгоритмов

Проверим работоспособность предложенных алгоритмов оценки локальности взаимодействия для различных моделей групп дронов. Все модели имели одинаковый шаг по времени и длительность наблюдения. Для всех из них были взяты $\delta t = 1$ или в рамках модели 20 шагов моделирования. Предполагаемое число соседей $n = 5$. Для модели группы это означает следующие предположения: дрон может переместиться не более чем на 15 метров (в целом соответствует характеристикам дрона коптерного типа).

Мы рассмотрели следующие виды организованных групп:

- Стабилизированный рой из 100 дронов **stable_1_swarm**.
- Стабилизированный рой из 100+1 дронов **stable_1_swarm_plus**.
- Не до конца стабилизированный рой из 100 дронов **middle_1_swarm**.
- Группа из 100 дронов **unstable_1_swarm**.

- Слияние двух роев по 100 дронов в каждом **stable_2_swarm**.
- Слияние двух групп по 100 дронов в каждом **unstable_2_swarm**.

При проведении экспериментов были использованы следующие этапы наблюдения за группой дронов.

- **Первые 500 шагов** моделирования. Первые шаги формирования пространственной структуры указанных выше групп из начального случайного состояния, в нашем случае это 500 шагов моделирования.
- **500 шагов посередине** моделирования. Группа дронов наблюдается в момент моделирования после формирования пространственной структуры, но до эволюций, связанных с выполнением миссии. Группа наблюдалась в течение 500 шагов. Начальный момент наблюдения взят после формирования группы.
- **Последние 500 шагов** моделирования. Группы в конце цикла моделирования, т.е. последние 500 шагов, когда группа начинает эволюционировать для выполнения миссии.
- **Все наблюдения**, кроме этапа формирования группы, проводились на протяжении всего цикла моделирования, за исключением этапа формирования структуры группы, то есть исключая первые 500 шагов моделирования. Исследуются значения параметров, вычисленных в течение 4500 шагов, что в 9 раз дольше, чем длительность предыдущих исследований.

Таблица 1. Наивный алгоритм (2)

	Первые 500	500 посередине	Последние 500	Все наблюдения
stable_1_swarm	0.2085	0.19228	0.00234	7.0287E-2
stable_1_swarm_plus	0.5314	0.024537	0.0012871	1.0936E-2
middle_1_swarm	0.7263	0.4325	0.545	0.44366
unstable_1_swarm	4.6946	3.8246	2.6027	3.5897
stable_2_swarm	0.6025	0.043695	0.02708	3.8138E-2
unstable_2_swarm	3.6424	2.7636	8.5552	7.7114

Таблица 2. Продвинутый алгоритм (4)

	Первые 500	500 посередине	Последние 500	Все наблюдения
stable_1_swarm	0.3952	9.8541E-5	0	6.9247E-4
stable_1_swarm_plus	3.0480E+5	0.1228	2.5180E-4	0.12715
middle_1_swarm	6.6052E+4	0.1164	2.4863	1.8494
unstable_1_swarm	1.1526E+8	473.2402	731.4760	232.673
stable_2_swarm	1.0375E+3	5.3812E-8	0.6948	13.064
unstable_2_swarm	5.086E+7	131.8226	2.0529E+8	9.7055E+6

Из анализа приведенных таблиц видно, что оба алгоритма показывают большую разницу рассчитанных параметров для групп, в которых присутствует локальное взаимодействие, в отличие от групп, где такое взаимодействие отсутствует. Причем отличие составляет несколько порядков. Однако, в этой ситуации для неустановившегося движения дронов в группе, т.е. на этапе формирования пространственной структуры группы (первая колонка), мы можем наблюдать разницу между группами с локальным взаимодействием (роями) и группами, когда взаимодействие нелокально – разница для продвинутого алгоритма составляет несколько порядков. Заметим, что на первом этапе формирования группы (первая колонка) хотя оба метода различают группы с локальным взаимодействием от групп без такого взаимодействия, «продвинутый алгоритм» более чувствителен, дает различие в значениях характеристики для разных типов групп на несколько порядков, тогда как «наивный алгоритм» – максимум на один порядок.

4. Выводы.

В результате нашего исследования предложены методы оценки локальности взаимодействия между дронами в группе, и на их основании, можем идентифицировать группы дронов как рой, имея возможность предсказывать поведение группы в различных случаях на основываясь на наличии локального взаимодействия. Оба предложенных метода показали, что они могут помочь в автоматизации анализа наличия локального взаимодействия дронов, но продвинутый алгоритм продемонстрировал большую чувствительность.

Список литературы

1. Cuthill E., McKee J. Reducing the Bandwidth of Sparse Symmetric Matrices // ACM '69 Proceedings of the 1969 24th national conference, 1969.
2. Matrix bandwidth minimization // Proceedings 1968 ACM National Conference by RICHARD ROSEN Mechanics Research. Inc. Los Angeles, California.
3. Бойко А.М., Гиргидов Р.А. Обеспечение пространственной устойчивости роя автономных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) // 10.31776/RTS CJ.9201. С. 85–90.
4. Бойко А.М., Гиргидов Р.А. Ключевые особенности алгоритмов формирования роя автономных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях отсутствия ГНСС и устойчивой радиосвязи // ТСJ.10103. DOI: 10.31776/RTS CJ.10103.
5. Handbook of research on design, control, and modeling of swarm robotics / Ying Tan, editor. 2016.