

К РАЗРАБОТКЕ ОБОБЩЁННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ, НАБЛЮДЕНИЯ, СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ В ГЕТЕРОГЕННОЙ СТАЕ РОБОТОВ¹²

Арсентьев В.Г.¹, Бубин А.Р.², Бурдун И.Е.², Криволапов Г.И.¹

¹ Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86. тел. (383) 286-80-45,
e-mail: kriwolapov@sibsutis.ru , www.sibsutis.ru

² ООО «ИНТЕЛНИКА»
630009, Новосибирск, ул. Никитина, 15-76, тел./факс (383) 266-20-92,
e-mail: info@intelonics.com, www.intelonics.com

Исследуется проблема построения обобщённой прикладной математической модели поведения системы «гетерогенная стая роботов – эксплуатационная среда – внешний оператор». Назначение модели – анализ и прогнозирование поведения системы в сложных и неизвестных ситуациях в процессе научного сопровождения жизненного цикла мобильной робототехники. Приводится пример формализации задачи применения гетерогенной стаи роботов, обладающих переменной степенью автономности, с целью поиска объекта в заданной области рабочего пространства. Характеризуются структура, назначение, состав и информационные потоки системной модели. Даются введение в базовые понятия модели стайного поведения, имеющие отношение к функциям наблюдения, управления и связи.

О концепции стайной робототехники

Применение малоразмерных роботов в форме самоорганизующейся группы (стаи³) рассматривается как перспективный способ повышения эффективности выполнения роботами опасных, однообразных или ресурсоёмких задач⁴ в сложных или неопределённых условиях эксплуатационной среды [1]. Данный прогноз справедлив для робототехники любого класса (надводной, подводной, донной, сухопутной, вездеходной, подземной, авиационной, космической, многосредной) и любой сферы её приложений (коммерческой, общественной, специальной, военной).

Роботы стайного поведения могут самостоятельно планировать и осуществлять своё движение в локальном пространстве на основе принципов адаптации и этологии, заимствованных у живой природы [2], в зависимости от текущей ситуации: особенностей задачи, фазы её выполнения, состояния элементов системы: отдельных роботов и стаи в целом, эксплуатационной среды, внешнего оператора. Благодаря самоорганизации стая роботов может достигать поставленных целей более надёжно и с меньшими затратами ресурсов (времени, связи, энергии, техники, интеллекта, внешнего управления и др.) по сравнению с группой роботов, управляемых дистанционно или автоматически по заданной программе.

Имитационное моделирование и жизненный цикл стайных систем

Система «стая роботов – эксплуатационная среда – внешний оператор» – это сложная (многоуровневая, многокомпонентная, нелинейная, нестационарная) динамическая система. Выходные характеристики стаи – эффективность, надёжность и безопасность применения –

¹ Арсентьев В.Г., Бубин А.Р., Бурдун И.Е., Криволапов Г.И. К разработке комплексной математической модели самоорганизации движения, наблюдения, связи и навигации в гетерогенной группе роботов, *Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», 2-6 июля 2012 г., ФГБОУ ВПО «СибГУТИ», Новосибирск, 2012.*

² © 2013, Арсентьев В.Г., Бубин А.Р., Бурдун И.Е., Криволапов Г.И.

³ роя, сети, сообщества, «коллектива», кооперации, кластера, порядка, потока, отряда и т.п.

⁴ работ, заданий, операций, функций, «миссий».

зависят от того, насколько качественно реализованы и согласованы между собой базовые функции её элементов и системные отношения. В том числе, это контроль состояния бортового оборудования, наблюдение локального пространства, управление пространственным движением, обмен информацией между роботами-соседями (обеспечение ситуационной осведомлённости), избегание столкновений, самоорганизация поведения, навигация, согласование конфликтующих целей, автономное принятие решений, накопление опыта и обучение, связь с внешним оператором и др.

Наиболее экономичным методом получения новых знаний о свойствах системы в нештатных или неизвестных ситуациях является вычислительный эксперимент на математической модели, описывающей поведение системы во времени. Имитационное моделирование играет важную роль в научном обеспечении жизненного цикла перспективной робототехники. Метод позволяет дополнить и в ряде случаев заменить дорогостоящие, длительные и сложные полунатурные и натурные испытания. Достоверная системная модель может использоваться в качестве виртуального испытательного стенда для прогнозирования характеристик системы в различных сценариях будущего применения, начиная с ранних этапов проектирования, с минимальными затратами ресурсов – времени, финансов, кадров, оборудования.

Пример формализации задачи

Формализуется поведение гетерогенной стаи высокоавтономных роботов R_i , $\Omega(R) = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_N\}$, с целью выполнения следующей задачи. С помощью кластера подводных роботов, $\Omega_U(R) \subset \Omega(R)$, осуществить поиск затонувшего объекта b в ограниченной области пространства, заданной в нормальной земной системе координат $F_E = (O_E X_E Y_E Z_E)$. В процессе поиска при помощи связанных роботов (подводных, надводных и авиационных) обеспечить межсредный информационный обмен между роботами из $\Omega_U(R)$ и внешним оператором. Местоположение объекта b неизвестно. Для идентификации объекта в процессе поиска использовать его отличительные признаки, $(\mu_1, \dots, \mu_{n(b)})$, включая, возможно, форму, размеры, окраску и др. Результатом успешного выполнения задачи должны быть координаты местонахождения объекта, $b(x_E y_E z_E)$, записи документирования процесса решения задачи, другая информация, передаваемая внешнему оператору.

Движение стаи $\Omega(R)$ в процессе выполнения задачи происходит в пределах заданной области пространства с системой координат F_E . Область поиска состоит из трёх однородных рабочих сред движения роботов соответствующего класса: подводного пространства, водной поверхности и воздушного пространства. В состав стаи $\Omega(R)$ входят N_U подводных роботов, в том числе – связанные подводные роботы R_k^C , а также N_S надводных роботов и N_A авиационных роботов, используемых для межсредного обмена, $N = N_U + N_S + N_A$, $N_U \in \{10, \dots, 100, \dots\}$, $N_S \in \{1, \dots, 5\}$, $N_A \in \{1, 2, 3\}$.

Факторы, определяющие достоверность моделирования стайных систем

Известно несколько математических моделей, описывающих стайное движение роботов основных классов с различной степенью точности имитации явления. Назначение моделей варьируется от демонстрации принципов стайного поведения, обоснования выбора параметров стайного взаимодействия, оценки эффективности базовых технологий и до изучения особенностей динамики и тактики стайного применения, оценки влияния опасных эксплуатационных факторов на характеристики стаи, репетиции сценариев выполнения конкретных задач, обучения операторов и др.

Степень достоверности результатов имитационного моделирования зависит от полноты и точности математического описания ключевых физико-логических свойств элементов системы и их взаимосвязей. Прежде всего, это следующие свойства:

- 1) аэрогидродинамические характеристики робота и характеристики силовой установки, используемые для расчёта внешних сил и моментов (влияние номенклатуры характеристик, используемых в модели, состояния рабочей среды, нестационарности и неравномерности обтекания, управления пограничным слоем, экранного эффекта, проницаемости корпуса, работы силовой установки, критериев подобия, параметров состояния и управления робота и др.);
- 2) динамика и кинематика робота (влияние количества моделируемых степеней свободы поступательного и вращательного движения, присоединённых масс и присоединённых моментов инерции рабочей среды (воздуха, воды, грунта, нефти и др.), вариаций конфигурации робота (моментов инерции, массы, аэрогидродинамической компоновки, положения центра масс и др.), реакций связей, в том числе – тросовых, работы оборудования полезной нагрузки);
- 3) влияние факторов эксплуатационной среды на внешние силы и моменты, действующие на робота (ветра, течения, волн, турбулентности, обледенения, отказов бортового оборудования, ошибок оператора, препятствий, состояния рабочей среды и т.п.);
- 4) влияние состояния рабочей среды (вариаций плотности, давления, температуры, солёности, прозрачности, зашумлённости, вязкости, сцепления и др.) на процессы наблюдения локального пространства, связи и управления робота;
- 5) перекрестное влияние параметров настройки базовых функций робота (измерения состояния, наблюдения пространства, управления, связи, навигации, принятия решений, самоорганизации) на движение стаи;
- б) влияние структуры и состояния единого информационного поля (модели ситуационной осведомлённости) членов стаи;
- 7) влияние способа организации интерфейса «стая – внешний оператор».

Для получения приемлемой достоверности результатов моделирования динамики стай в реалистичных сценариях применения необходимо повышать уровень детализации и точности математического описания физики пространственного движения роботов, информационно-логических связей в стае, функций бортового оборудования. Степень подробности описания перечисленных выше свойств в модели должна быть примерно одинаковой и достаточно глубокой, особенно для тех бортовых подсистем, опасных факторов эксплуатационной среды и (или) взаимосвязей в стае, которые предполагается исследовать в вычислительном эксперименте.

Состав обобщённой системной модели

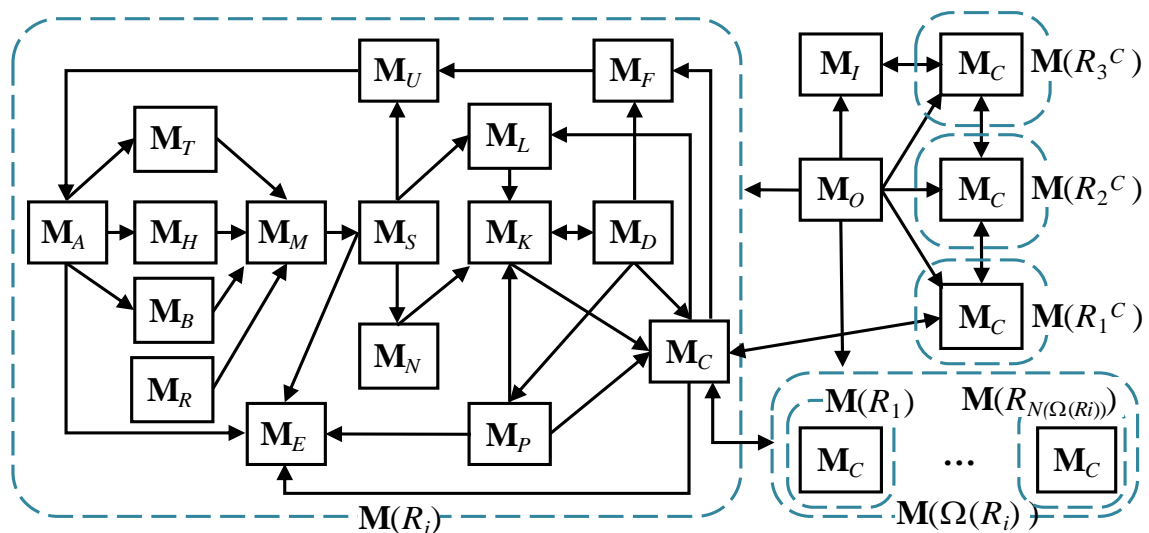
Состав обобщённой математической модели поведения системы «стая роботов – эксплуатационная среда – внешний оператор», которую целесообразно использовать для исследований задач практического применения стайной робототехники, приводится в таблице 1.

Таблица 1 – Основные модели-составляющие обобщённой системной модели

№	Обозначение	Моделируемые свойства
1.	M_H	аэрогидродинамика робота
2.	M_B	вес и аэрогидростатика робота
3.	M_M	динамика и кинематика движения робота с шестью степенями свободы
4.	M_U	управление пространственным движением робота
5.	M_L	наблюдение локального пространства робота
6.	M_S	функционирование датчиков (измерение параметров состояния) робота

7.	M_A	работа силовых приводов робота
8.	M_R	работа шасси (опорных устройств), других реакций связей робота
9.	M_T	работа силовой установки (двигателей) робота
10.	M_P	работа оборудования полезной нагрузки робота
11.	M_C	связь (местный и удалённый информационный обмен) в стае
12.	M_E	расходование бортового запаса энергии (топлива)
13.	M_N	навигация и наведение робота
14.	M_K	формирование единого информационного поля стаи
15.	M_D	принятие решений роботом
16.	M_F	самоорганизация движения робота
17.	M_O	эксплуатационная среда (погода, отказы оборудования, ошибки оператора)
18.	M_I	человеко-машинный интерфейс в системе «внешний оператор – стая»

Структура обобщённой системной модели и основные потоки данных показаны на рис. 1.

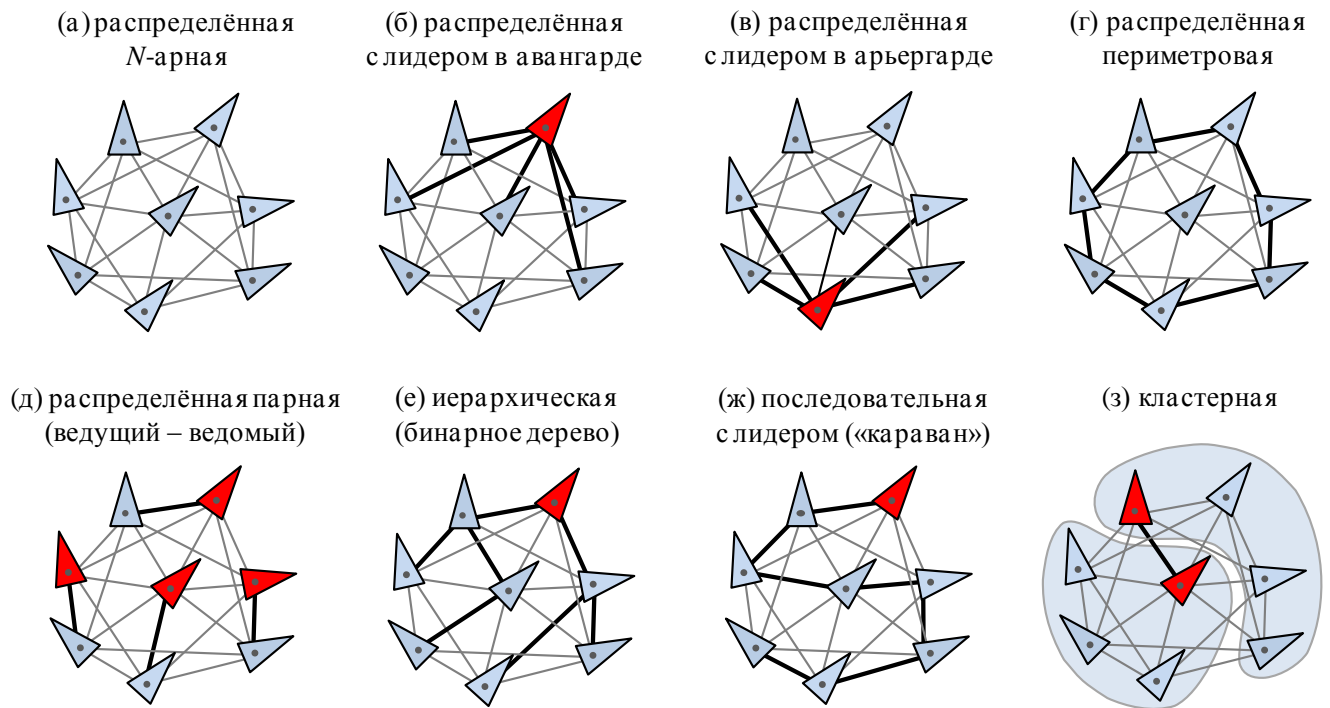


Пояснение: ← направление потока данных в модели.

Рис. 1. Структура системной модели и основные потоки данных

Из данных рис. 1 следует, что модель поведения одиночного робота R_i , $M(R_i)$, включает модели-составляющие с порядковыми номерами от 1 до 16 из таблицы 1, то есть $M(R_i) = \{M_H, M_B, \dots, M_F\}$. Модель поведения подмножества роботов, образующих в текущий момент времени t локальную окрестность робота R_i , есть объединение моделей $M(R_1), \dots, M(R_j), \dots, M(R_{N(\Omega(R_i))})$, $j \neq i$, $\Omega(R_i) \subset \Omega(R)$ и $\Omega(R_i) = f(t)$.

Состав моделей поведения связанных роботов $M(R_1^C)$, $M(R_2^C)$ и $M(R_3^C)$ аналогичен табл. 1. Принципы организации обмена информацией и архитектур ситуационного управления в стае роботов представлены на рис. 2.



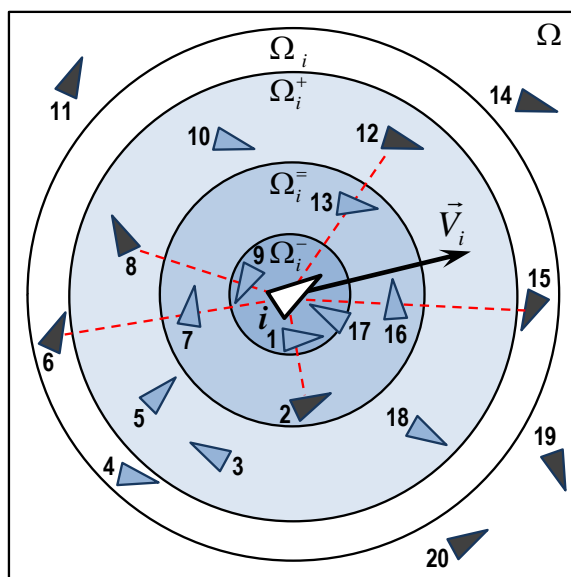
Пояснения:

— — наблюдение, «локальная» связь; — — управление, «дальняя» связь; — лидер, связанной; — рядовой робот, ведомый

Рис. 2. Общие принципы организации обмена информацией и архитектур ситуационного управления в стае

Базовые понятия, связанные с функциями наблюдения, связи и управления в стае роботов

Локальное пространство (окрестность) робота $\Omega(R_i)$ – это часть пространства вокруг робота, в которой могут находиться другие роботы, сторонние объекты и состояние которой может влиять на поведение робота и его соседей (рис. 3).



$$\begin{aligned} \Omega_i &\equiv \Omega(R_i); \\ \Omega_i &= \{R_1, R_9, R_{17}\}; \\ \Omega_i^- - \Omega_i^- &= \{R_2, R_7, R_{13}, R_{16}\}; \\ \Omega_i^+ - \Omega_i^- &= \{R_3, R_5, R_8, R_{10}, R_{12}, R_{18}\}; \\ \Omega_i - \Omega_i^+ &= \{R_4, R_6, R_{15}\}; \\ \Omega - \Omega_i &= \{R_{11}, R_{14}, R_{19}, R_{20}\}; \\ \Omega_i^{NO} &= \{R_2, R_6, R_8, R_{12}, R_{15}\}; \\ \Omega_i^{TO} &= \Omega_i - \Omega_i^{NO}; \\ \Omega_i^{TO} &= \{R_1, R_3, R_4, R_5, R_7, R_9, R_{10}, R_{13}, R_{16}, R_{17}, R_{18}\}; \\ N(\Omega) &= 20; N(\Omega_i) = 16; \\ N(\Omega_i^{NO}) &= 5; N(\Omega_i^{TO}) = 11. \end{aligned}$$

Рис. 3. Характерные подмножества объектов в локальном пространстве стайного робота (пример)

Границы локального пространства стайного робота могут иметь форму эллипсоида, сферы, конуса (рис. 4), либо более сложную конфигурацию [3].

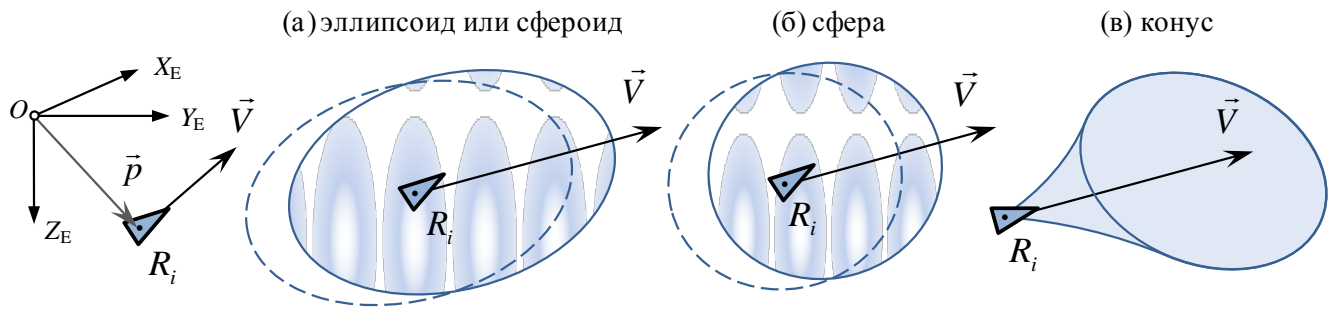


Рис. 4. Некоторые возможные конфигурации локального пространства мобильного робота

Объект в локальном пространстве робота – это любое физическое тело, подвижное или неподвижное, которое там присутствует, в том числе: другой робот, предмет неживой природы, человеко-машинная система, человек, другой живой организм и т.п.

Наблюдаемое пространство робота $\Omega^{To}(R_i)$ – это часть локального пространства $\Omega(R_i)$, которая может наблюдаться роботом при помощи собственных измерительных устройств, измерительных устройств других роботов, а также внешних по отношению к стае измерительных систем. Наблюдение локального пространства – это процесс сканирования локального пространства и поиска в нём объектов при помощи средств наблюдения, фиксирующих информационный след от физических полей, которые оставляют в нём объекты. Конфигурация и размеры наблюдаемой области могут изменяться в течение ситуации.

Ненаблюдаемая область локального пространства $\Omega^{No}(R_i)$ – это дополнение наблюдаемого пространства робота до локального пространства, $\Omega^{No}(R_i) = \Omega(R_i) - \Omega^{To}(R_i)$. Конфигурация и размеры ненаблюдаемой области могут изменяться в течение ситуации.

Зона отталкивания робота $R_i(\Omega_i^-)$ – это часть наблюдаемого локального пространства робота, в которой главной целью (императивом) поведения R_i является обеспечение «личной безопасности» или «комфорта» (см. рис. 3 и [2, 3]). Зона Ω^- должна быть расположена к роботу наиболее близко, а её мониторинг должен иметь наибольшую важность для робота. Если в этой зоне обнаруживаются роботы-соседи или другие объекты, то система управления робота вычисляет направление и модуль вектора силы отталкивания \vec{F}_i^- , необходимой для увода R_i от возможных столкновений.

Зона выравнивания робота $R_i(\Omega_i^=)$ – это часть наблюдаемого локального пространства робота, в которой императивом поведения R_i является выравнивание вектора скорости его движения с вектором средней скорости движения роботов-соседей, находящихся в этой зоне (см. рис. 3). Система управления робота вычисляет направление и модуль вектора силы выравнивания $\vec{F}_i^=$, необходимой для согласования роботом R_i своей скорости со средней скоростью движения соседей.

Зона притяжения робота $R_i(\Omega_i^+)$ – это часть наблюдаемого локального пространства робота, в которой императивом поведения R_i является обеспечение единения с подмножеством роботов-соседей (см. рис. 3). Система управления робота вычисляет направление и модуль вектора силы притяжения \vec{F}_i^+ , необходимой для занятия роботом R_i положения, близкого к «центру масс» подмножества соседей.

Каждая из указанных выше характерных зон локального пространства робота имеет свой радиус, соответственно: $\delta_i^-, \delta_i^=, \delta_i^+$, причем $\delta_i^* = f(\vec{V}, N(\Omega(R_i)), x_E, y_E, z_E)$.

Направление и модуль силы отталкивания для робота R_i вычисляются по формулам:

$\vec{d}_i^- = -\frac{1}{N_i^-} \sum_{j=1}^{N_i^-} \frac{\vec{r}_{ij}^-}{|\vec{r}_{ij}^-|^2}$ и $\vec{F}_i^- = k_i^- \frac{\vec{d}_i^-}{|\vec{d}_i^-|}$, где $\vec{r}_{ij}^- = (\vec{r}_j - \vec{r}_i)$ – вектор, направленный от робота R_i к соседу R_j ; \vec{d}_i^- – вектор, указывающий заданное направление от робота R_i для отталкивания от всех опасных соседей; k_i^- – весовой коэффициент.

Направление и модуль силы выравнивания: $\vec{d}_i^- = -\frac{1}{N_i^-} \sum_{j=1}^{N_i^-} \vec{e}_{xj}$, $\vec{F}_i^- = k_i^- \frac{\vec{d}_i^- - \vec{e}_{xi}}{|\vec{d}_i^- - \vec{e}_{xi}|}$, где \vec{d}_i^- – вектор, указывающий заданное направление вектора скорости робота R_i для выравнивания; \vec{e}_{xi} и \vec{e}_{xj} – векторы, указывающие направление движения роботов R_i, R_j ; k_i^- – весовой коэффициент.

Направление и модуль силы притяжения: $\vec{d}_i^+ = -\frac{1}{N_i^+} \sum_{j=1}^{N_i^+} \frac{\vec{r}_{ij}^+}{|\vec{r}_{ij}^+|}$, $\vec{F}_i^+ = k_i^+ \frac{\vec{d}_i^+}{|\vec{d}_i^+|}$, где $\vec{r}_{ij}^+ = (\vec{r}_j - \vec{r}_i)$ – радиус-вектор, указывающий направление от R_i к R_j ; \vec{d}_i^+ – вектор, указывающий заданное направление от робота R_i к «центру масс» роботов-соседей; k_i^+ – весовой коэффициент.

Весовые коэффициенты $k_i^-, k_i^=, k_i^+$ в уравнениях расчёта управляющих сил $\vec{F}_i^-, F_i^=, \vec{F}_i^+$ задают текущие приоритеты составляющих сил при суммировании. Результирующий вектор сил базовой стайной модели (без учёта составляющих сил, генерируемых полем потенциала состояния выполняемой задачи или команды внешнего оператора) определяется по формуле: $\vec{F}_i^\Sigma = \vec{F}_i^- + \vec{F}_i^= + \vec{F}_i^+$, $|F_i^\Sigma| = \min[\max(F_i^{\min}, |F_i^\Sigma|), F_i^{\max}]$. Известны и другие методы расчёта сил $\vec{F}_i^-, F_i^=, \vec{F}_i^+$.

Алгоритмы реализации правила отталкивания, выравнивания и притяжения роботов (модель К.Рейнольдса) более подробно характеризуются в работах [2, 3].

Основы функции самоорганизации движения робота

Таким образом, поведение робота в стае определяется динамической суперпозицией нескольких конфликтующих целей движения при выполнении общей задачи в составе стаи. Основными из этих целей являются: «не сталкиваться» (G^-), «выравнивать скорости» ($G^=$), «держаться вместе» (G^+), «выполнять задачу» (G^\rightarrow) и др. Приоритет или «вес» цели G^\bullet , k^\bullet , где $\bullet \in \{-, =, +, \rightarrow, \dots\}$, может быть функцией динамических свойств стаи, выполняемой задачи, параметров «эмоциональной» настройки роботов, команд оператора, других факторов.

Таким образом, система управления робота R реализует базовые функции управления $U^-, U^=, U^+, U^\rightarrow, \dots$ для достижения целей $G^-, G^=, G^+, G^\rightarrow, \dots$, а также функцию их согласования U^Σ в зависимости от общей ситуации, которая сложилась в локальном пространстве робота к моменту времени t .

Результатом работы системы управления робота в момент времени $t + \Delta^U$ являются вектор заданной скорости движения по траектории \vec{V}^G , $\vec{V}^G = [V^G \Theta^G \Psi^G]^T$, а также, возможно⁵, вектор заданного углового положения робота $[\phi^G \theta^G \psi^G]^T$, где Δ^U – шаг стайного управления, $\Theta^G, \Psi^G, \phi^G, \theta^G, \psi^G$ – заданные значения, соответственно, углов наклона траектории, курса,

⁵ для роботов определённых классов при выполнении определённых задач.

тангажа, крена и рыскания. Приоритеты или весовые коэффициенты целей вычисляются в зависимости от расстояний между роботом и других факторов.

Базовые характеристики стаи

Схема стайного движения и другие базовые функции системной модели, в том числе функции связи и внешнего управления, основаны на вычислении и анализе характеристик стаи в процессе моделирования (эксперимента). Рассмотрим некоторые базовые характеристики стаи.

Численность стаи роботов (N или $N(\Omega(R))$) – это общее количество роботов в стае. Численность стаи может изменяться в ходе выполнения задачи – вследствие потерь, неисправностей или пополнения, то есть $N = f(t)$. Максимальная численность стаи зависит от класса роботов и выполняемой задачи и может достигать величины порядка $10^2 \dots 10^5$.

«Центр масс» стаи (p_{\otimes}) – это точка в пространстве с координатами, $p_{\otimes}(x_{E\otimes}, y_{E\otimes}, z_{E\otimes})$, удовлетворяющая условиям: $x_{E\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{Ei}$, $y_{E\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{Ei}$, $z_{E\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{Ei}$. Данная характеристика применима и для любого подмножества стаи – кластера, локальной окрестности $\Omega(R_i)$ и т.п.

Средняя скорость стаи \vec{V}_{\otimes} – это скорость перемещения «центра масс» стаи относительно нормальной земной системы координат: $\vec{V}_{\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{V}_i$. Данная характеристика применима и для любого подмножества стаи.

Радиус стаи r_{\otimes} – это усреднённое расстояние от роботов до «центра масс» стаи, определяется по формуле: $r_{\otimes} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_{i\otimes}^2}$, где $d_{i\otimes}$ – расстояние от робота R_i до «центра масс» стаи $p_{\otimes}(x_E, y_E, z_E)$. Данная характеристика применима также для любого подмножества стаи.

Средний путевой угол стаи: $\Psi_{\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Psi_i$. Степень поляризации стаи по курсу:

$p_{\Psi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{|\angle(\vec{V}_i, \vec{V}_{\otimes})|}{\pi} \right)$, где угол $\angle(\vec{V}_i, \vec{V}_{\otimes})$ измеряется в радианах. Для стаи, у членов которой векторы скорости коллинеарны, имеем $p = 1$ (полная согласованность скорости, то есть $(\forall \vec{V}_i)(i = 1, \dots, N)(\angle(\vec{V}_i, \vec{V}_{\otimes}) = 0 \vee \angle(\vec{V}_i, \vec{V}_{\otimes}) = \pi)$). Стая, в которой все агенты имеют взаимно перпендикулярные векторы скорости, имеет степень поляризации, равную $p = 0,5$ (полное отсутствие согласованности по скорости).

Степень поляризации стаи по курсу (альтернативное определение): $p_{\Psi_2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Psi_{\otimes} - \Psi_i)^2}$.

Средний угол наклона траектории стаи вычисляется по формуле: $\Theta_{\otimes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Theta_i$. Степень

поляризации стаи по наклону траектории: $p_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Theta_{\otimes} - \Theta_i)^2}$.

Заключение

В работе рассмотрена проблема построения обобщённой математической модели поведения системы «гетерогенная стая роботов – эксплуатационная среда – внешний оператор». Достоверность и объём знаний, получаемых на выходе системной модели, зависят от точности и полноты базы данных исходных физических характеристик («параметрического определения») роботов, образующих стаю, степени адекватности математических моделей управляемого движения роботов, наблюдения локального пространства, информационного обмена, влияния факторов эксплуатационной среды, а также параметров настройки стайной модели.

Литература

1. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. База данных публикаций, состояние и перспективы разработок в области мобильной робототехники «стайного» применения (аналитический обзор) // Сб. материалов 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана», 3-7 октября 2011 года, г. Владивосток, 2011, с. 339-345.
2. Reynolds, C.W. Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavioural Model // Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21, No. 4, – PP. 25–34.
3. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», 9-13 августа 2010 года, СибГУТИ. Новосибирск. 2010. С. 141-149.