

© 2012 г. А.Ю. ЕФРЕМОВ
Ю.С. ЗАТУЛИВЕТЕР, канд. техн. наук
Ю.С. ЛЕГОВИЧ, канд. техн. наук
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМОВ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ КОНФИГУРИРОВАНИЯ КВАЗИСИЛОВЫХ ПОЛЕЙ

В статье рассматривается задача обеспечения согласованного движения группы автономных объектов на плоскости с учетом их габаритов, а также при наличии ограничений на скорость и ускорение. Метод решения основан на конфигурировании квазисиловых полей, а также на использовании виртуальных указателей. Разрабатываемая модель составляет основу для параллельной реализации алгоритмов сетецентрического управления в распределённой вычислительной среде.

DEVELOPMENT OF MODEL AND NET-CENTRIC CONTROL ALGORITHMS FOR OBJECTS GROUP LOCOMOTION USING CONFIGURATION OF QUASI-POWER FIELDS / A.Yu. Efremov, Yu.S. Zatuliveter, Yu.S. Legovich (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Profsoyuznaya 65, Moscow 117342, Russia, E-mail: andre@ipu.ru, zvt@ipu.rssi.ru, legov@ipu.ru). This article considers the task of ensuring the coordinated movement of autonomous objects on a plane, in consideration of their dimensions, and if there are restrictions on speed and acceleration. The decision is based on the configuration of quasi-power fields, as well as on the use of virtual signposts. The model is the basis for the parallel implementation of net-centric control algorithms in a distributed computing environment.

1. Введение

В последние годы широкое распространение получили разработки, направленные на создание автономных объектов различного типа, управляемых при помощи компьютерного интеллекта без непосредственного участия человека. В качестве основных направлений развития таких объектов можно указать следующие: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), беспилотные автотранспортные средства.

Естественным образом, на первом этапе развития рассматривалась задача управления одиночным автономным объектом. Однако дальнейшее развитие предусматривает создание систем согласованного управления группой таких объектов, возможно разнотипных, позволяющих повысить эффективность их использования, а также решать задачи, которые невозможно решить при помощи множества разобщенных объектов.

Широкое распространение и совершенствование компьютерных сетей привело к их широкому использованию в целях управления распределенными интегрированными системами объектов со встроенным компьютерным интеллектом. Управление распреде-

ленной системой, каждый из элементов которой оснащен встроенными компьютерно-сетевыми средствами, осуществляется в сильносвязном информационном пространстве. Данные системы обладают способностью к автономному функционированию в различных средах, а управление же функционированием таких объектов программируется таким образом, чтобы вся совокупность объектов в согласованном взаимодействии между собой в едином информационном пространстве обеспечивала решение поставленных задач. Такие системы получили название сетецентрических и составляют основу передовых направлений развития больших систем [1].

Одной из актуальных задач является создание сетецентрических систем управления распределенными системами. В данной статье рассматривается задача обеспечения согласованного движения группы автономных объектов (далее, мобильных роботов – МР) на плоскости с обходом препятствий, например, движение БПЛА на заданной высоте.

Разрабатываемая модель составляет основу для параллельной реализации алгоритмов сетецентрического управления в распределённой вычислительной среде, образуемой группой мобильных объектов со встроенным компьютерно-сетевым интеллектом.

2. Математическая модель

2.1. Постановка задачи

Движение группы МР на плоскости с обходом препятствий. Задача решается при следующих предположениях:

- МР имеет габариты (задаются диаметром описанной окружности);
- МР имеет ограничение на скорость (минимальное и максимальное значение);
- МР имеет ограничение на ускорение (по модулю и по углу поворота);
- Зоны препятствий интерполируются окружностями;
- МР обмениваются информацией о своем местоположении, а также другими необходимыми данными в реальном времени (задержки не учитываются).

2.2. Уравнения движения

Метод решения данной задачи основан на использовании хорошо известного метода потенциалов [2], а также на работе [3] в которой используются «виртуальные указатели» (virtual signposts).

Модель движения МР описывается уравнением первого порядка, которая в дискретном виде записывается следующим образом [1, 3]:

$$(1) \quad r_i(k+1) = r_i(k) + u_i(k) * \Delta t$$

где $r_i(k)$ – вектор местоположения i -го МР, $u_i(k)$ – управляющее воздействие (фактически, вектор скорости), Δt – шаг времени.

Для вычисления u_i требуется определить взаимное влияние объектов в квазисиловом поле, где каждый объект воздействует на другие в зависимости от множества факторов: типа объекта, взаимного расположения (с учетом вектора скорости), расстояния между ними. В качестве таких объектов выступают другие МР, препятствия, точки притяжения (например, узловые точки маршрута), а также виртуальные указатели. В нашем случае препятствия описываются при помощи множества окружностей, в центре которых находятся виртуальные указатели (см. далее разделы 2.4 и 3).

Управляющее воздействие вычисляется по следующим формулам:

$$(2) \quad u_i = f(\tilde{u}_i)$$

$$(3) \quad \tilde{u}_i = v_i \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{pmatrix}$$

$$(4) \quad v_i = \frac{\sum_{j=1}^N \beta_{ij} v_{ij}}{\sum_{j=1}^N \beta_{ij}}$$

$$(5) \quad \theta_i = \arctan \left(\frac{\sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sin \theta_{ij}}{\sum_{j=1}^N \beta_{ij} \cos \theta_{ij}} \right)$$

где v_i и θ_i - модуль и направление желаемого управляющего воздействия \tilde{u}_i , v_{ij} и θ_{ij} - модуль и направление силы воздействия j -го объекта, β_{ij} - весовые коэффициенты.

Отличительной чертой нашей модели является наличие функции f , которая учитывает ограничения на скорость (диапазон допустимых значений) и ускорение (по модулю и по углу поворота) и преобразует желаемое управляющее воздействие в допустимое.

2.3. Взаимное влияние МР

Определяющим фактором в данной модели является задание функций, описывающих взаимное влияние объектов друг на друга.

Мы предполагаем, что согласованное движение группы МР означает, что они движутся совместно на заданном расстоянии друг от друга. При обходе препятствий МР могут расходиться, но впоследствии опять собираются вместе. В общем случае, заданное расстояние между разными МР может быть различным, но в данной модели оно выбрано постоянным и равно D . Выбор данного значения зависит от различных факторов, главными из которых являются габариты МР, а также допустимые значения скорости и ускорения. Правильный выбор D помогает избегать столкновений МР.

Весовые коэффициенты в модели вычисляются по законам, определенным в работе [3]. Взаимное влияние j -го МР на i -ый МР зависит от расстояния между ними $\|r_{ij}\|$, где $r_{ij} = r_i - r_j$ и от их взаимного расположения.

Если расстояние меньше желаемого, то должна быть реализована функция отталкивания. Если j -ый МР впереди i -го, то желаемое поведение i -го МР относительно j -го состоит в том, чтобы снизить скорость до минимально возможной. Если же j -ый МР позади i -го, то желаемое поведение i -го МР относительно j -го состоит в том, чтобы увеличить скорость до максимально возможной. Направление вектора желаемой скорости совпадает с направлением вектора r_{ij} .

Если расстояние больше желаемого, то должна быть реализована функция притяжения. Если же j -ый МР впереди i -го, то желаемое поведение i -го МР относительно j -го состоит в том, чтобы увеличить скорость до максимально возможной. Если j -ый МР позади i -го, то желаемое поведение i -го МР относительно j -го состоит в том, чтобы сни-

зять скорость до минимально возможной. Направление вектора желаемой скорости противоположно направлению вектора r_{ij} .

Если расстояние равно желаемому, то должна быть реализована функция имитации. При этом, желаемое поведение i -го МР относительно j -го состоит в том, чтобы поддерживать скорость j -го МР, независимо от их взаимного расположения.

Как показано в работе [3], жесткий выбор модели поведения (отталкивание, притяжение, имитация) в зависимости от расстояния между МР привела бы к скачкам при переходе через D , поэтому был применен подход, основанный на нечеткой логике, где желаемое поведение рассчитывается с учетом весовых коэффициентов всех трех возможных моделей поведения.

$$(6) \quad v_{ij} = \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} v_{ij,b} / \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b}$$

$$(7) \quad \theta_{ij} = \arctan \left(\sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} \sin \theta_{ij,b} / \sum_{b \in B} \alpha_{ij,b} \cos \theta_{ij,b} \right)$$

где v_{ij} и θ_{ij} - модуль и направление силы воздействия j -го МР, B – множество основных моделей поведения (отталкивание, притягивание, имитация), $v_{ij,b}, \theta_{ij,b}, \alpha_{ij,b}$ – модуль и направление вектора силы и весовые коэффициенты для данных моделей поведения.

Если $i \neq j$, то коэффициенты $\alpha_{ij,b}$ вычисляются в соответствии с функциональными зависимостями, представленными на рис.1. Влияние же объекта на свое собственное поведение заключается в использовании только функции имитации, ее коэффициент α равен 1, а соответствующие коэффициенты для функций отталкивания и притяжения равны 0.

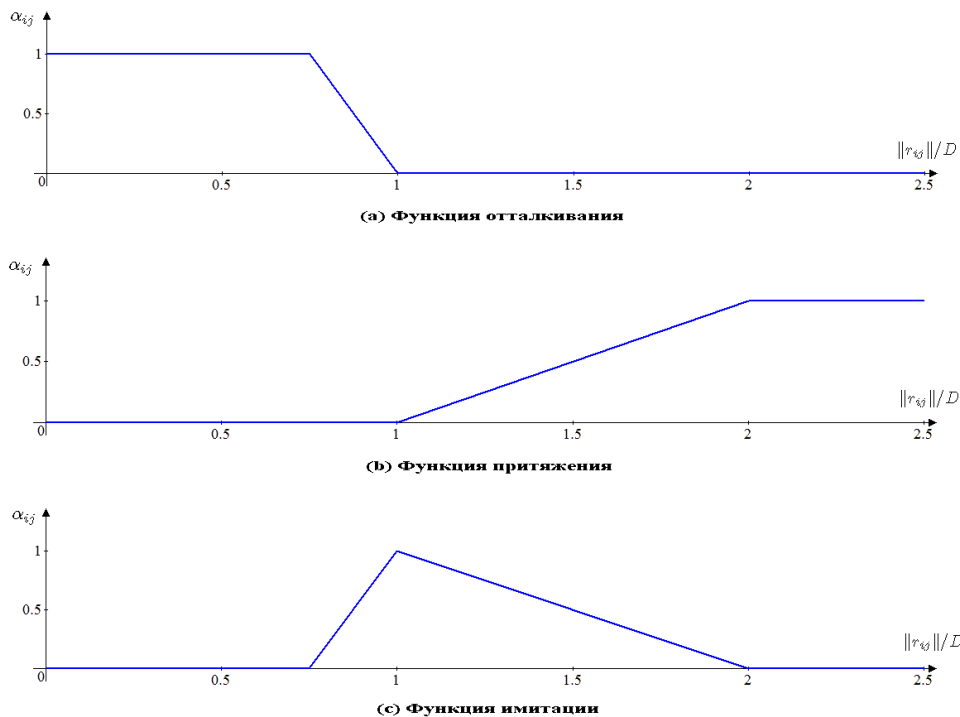


Рис. 1. Графики функций влияния $\alpha_{ij,b}$ ($i \neq j$) для различных моделей поведения

Весовые коэффициенты β_{ij} ($i \neq j$) также зависят от расстояния между МР. Мы использовали параметрическую функцию третьего порядка:

$$(8) \quad \beta_{ij} = \begin{cases} y_2 - (y_2 - y_1) * (x/x_1)^3, & \text{если } 0 \leq x \leq x_1 \\ y_1 * (x - x_2)^3 / (x_1 - x_2)^3, & \text{если } x_1 < x \leq x_2 \\ 0, & \text{если } x > x_2 \end{cases}$$

где $x = \|r_{ij}\|/D$, приведенное расстояние между i -ым и j -ым МР, x_1, x_2, y_1, y_2 – параметры. На рис.2 показан график такой функции при $x_1 = 1.5, x_2 = 3.5, y_1 = 4, y_2 = 7$.

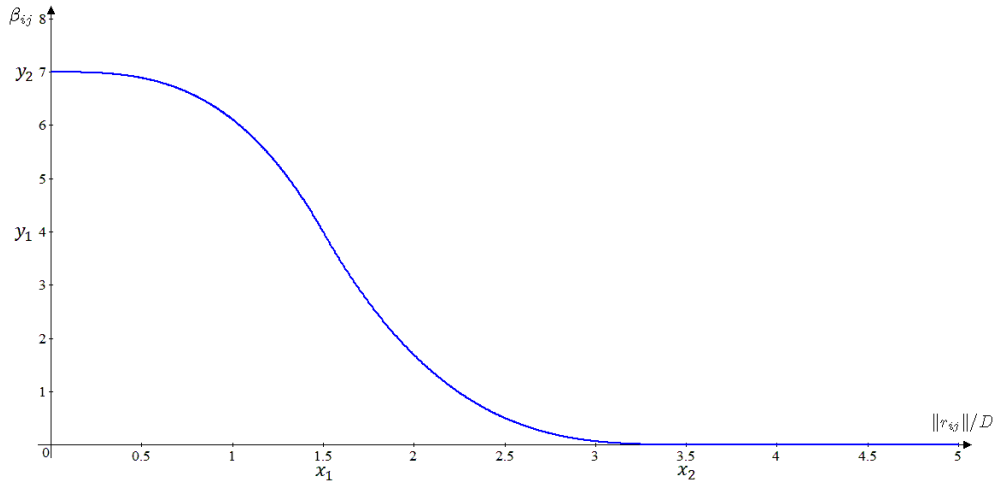


Рис. 2. Пример функции для расчета коэффициентов β_{ij} ($i \neq j$)

Коэффициенты $\beta_{ii} = 1$, т.е. МР всегда оказывает влияние на свое собственное поведение в «полной» степени.

2.4. Виртуальные указатели

Виртуальные указатели (virtual signposts) представляют собой виртуальные объекты, которые могут использоваться для различных целей. Они не имеют габаритов, но им приписываются текущие координаты в пространстве и вектор скорости (хотя они и не двигаются), что позволяет им оказывать влияние на МР, как будто они являются реальными объектами. В тоже время, на виртуальные указатели никакие силы не действуют.

Как и в работе [3], мы рассматривали два типа виртуальных указателей: реперные точки притяжения и зоны препятствий.

Реперная точка притяжения представляет собой стационарный объект, который располагается в определенной точке пространства и притягивает к себе все МР с постоянной силой независимо от расстояния между ними, т.е. у нее присутствует только одна модель поведения: притяжение.

Зона препятствия представляет собой протяженный стационарный объект представленный окружностью. Ее центр располагается в определенной точке пространства (плоскости) и отталкивает от себя все МР, когда они к нему приближаются. В нашем случае, зоны препятствий описывается множеством таких объектов. Помимо модели поведения «отталкивание» препятствие может иметь также модель поведения «имитация», что позволяет задать направление обхода препятствия. Это достигается с помощью задания направления вектора скорости для виртуального указателя, описывающего

препятствие, под углом 90 градусов к направлению движения МР в нужную сторону. Модель поведения «притяжение» отсутствует. Более подробно об этом можно узнать в работе [3], а также будет проиллюстрировано на демонстрационном примере (см. раздел 3).

2.5. Настройка модели

При настройке модели важным является правильный выбор параметра D (желаемого расстояния между МР), а также весовых коэффициентов β_{ij} , а, фактически, параметров x_1, x_2, y_1, y_2 , описывающих их зависимость от расстояния.

Главными факторами, влияющим на этот выбор являются заданные ограничения на скорость и ускорение, а также габариты МР.

При описании зон препятствий важно правильно интерполировать их множеством окружностей, а также определиться с необходимостью задавать направление обхода. Кроме того, при задании функции отталкивания от препятствия важную роль может играть количество МР в группе. Качественно это можно описать следующим образом: при увеличении числа МР сила отталкивания должна начинать действовать раньше, т.е. на большем расстоянии от препятствия.

Правильный выбор коэффициентов позволяет решать следующие задачи:

- Согласованное движение группы МР на заданном расстоянии (с учетом габаритов) друг от друга (при свободном движении, без препятствий);
- Обход препятствий с учетом габаритов МР и ограничений на скорость и ускорение;
- Объединение МР в группу после обхода препятствия, если необходимо было обходить его с разных сторон.

Использование виртуальных указателей позволяет задавать движение по заданному маршруту, а также задавать предпочтительное направление обхода препятствия всей группой (при необходимости).

Следует также отметить, что наличие ограничений на скорость и ускорение позволяет получать «гладкие» кривые скорости для МР, что является важным условием возможного применения данного алгоритма на практике.

3. Пример программной реализации

Движение группы из трех МР по заданному маршруту с обходом зон препятствий.

В точках перегиба маршрута помещены виртуальные указатели типа «реперная точка притяжения». Одновременно активна только одна такая точка (следующая, после пройденной, реперная точка маршрута), остальные не активны. Активная точка показана синим цветом, остальные – белым. При достижении любого из МР окрестности активной точки маршрута, она становится не активной и активизируется следующая.

Препятствия интерполируются окружностью, в центре которой помещен виртуальный указатель типа «препятствие». Он показан треугольником, направление которого указывает его вектор скорости, что позволяет задавать направление обхода препятствия, если он направлен под углом 90 градусов к направлению желаемой траектории (самое нижнее препятствие). Если же он направлен вдоль желаемой траектории, то каждый МР из группы определяет направление обхода самостоятельно.

На рис.3-4 показаны скриншоты работы программы. На рис.5 показан график изменения скорости движения одного из МР в группе (красным цветом), а зеленым цветом показан график желаемого изменения скорости (без учета ограничений).

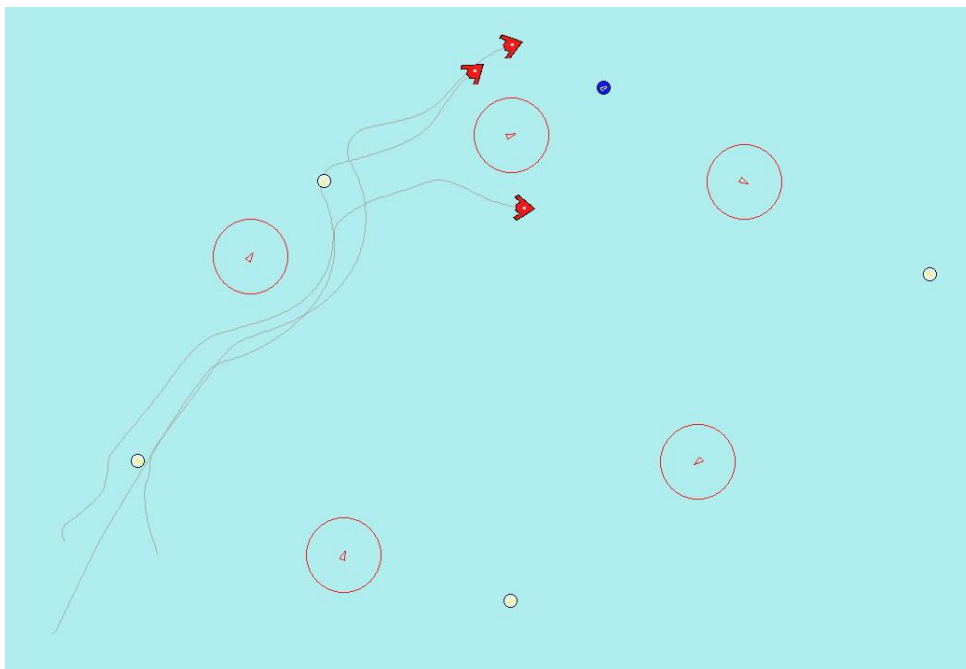


Рис. 3. Скриншот 1. Расхождение группы при облёте зоны препятствия

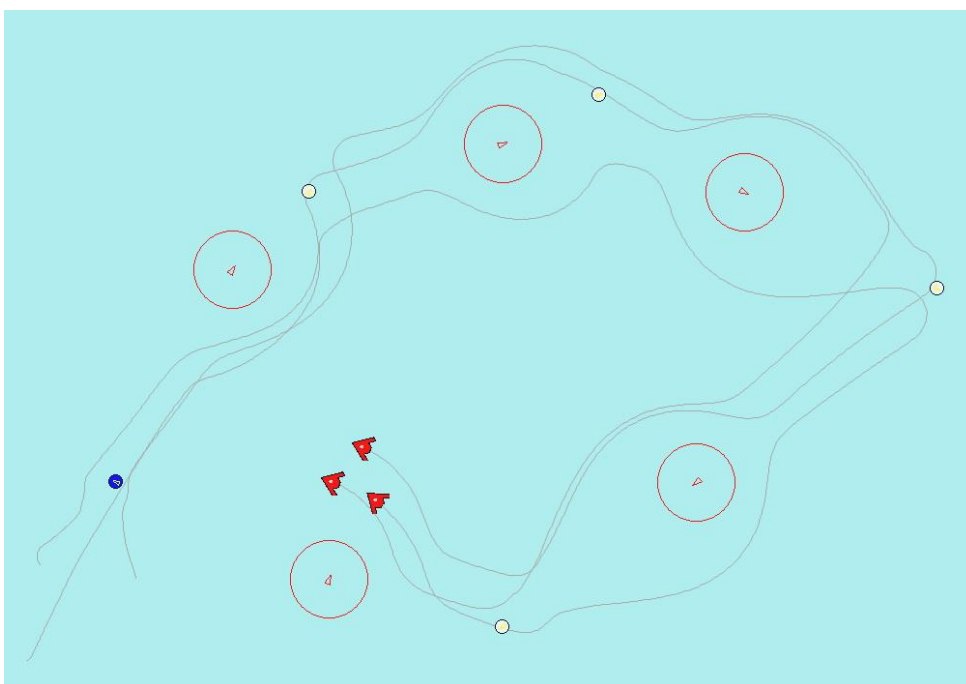


Рис. 4. Скриншот 2. Облёт группой зоны препятствия

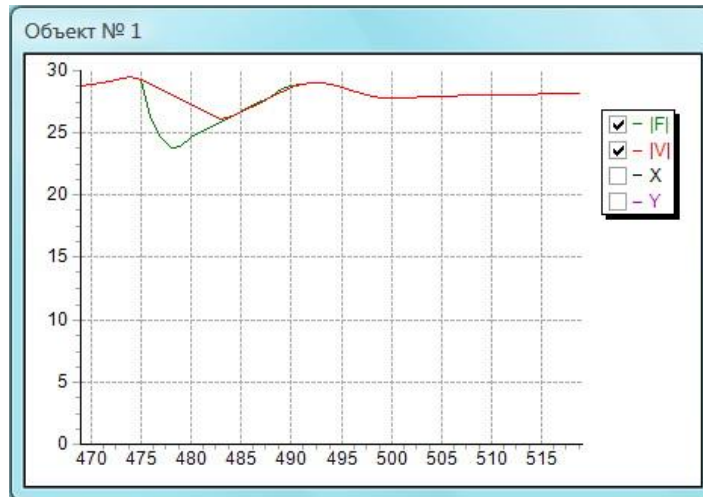


Рис. 5. График изменения скорости

Доклад иллюстрируется видеороликом, показывающим программную реализацию данного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Затуливетер Ю.С., Ходаковский И.А. Движение управляемых объектов с дистанционными взаимодействиями. // Труды пятой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления», РАСО'10. Москва, 2010, С. 1209 – 1218.
2. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. Москва, 2001.
3. Rochefort Y, Piet-Lahanier H., Bertrand S., Beauvois D., Dumur D. Guidance of Flocks of Vehicles Using Virtual Signposts // Preprints of the 18th IFAC World Congress. 2011. P. 5999–6004.