

УДК [681.513.3:004.896]:[621.396.969.36:531.211.3]

**П. В. Степанов**, аспирант, stepanov.pavel.v@inbox.ru,  
**И. А. Щербатов**, канд. техн. наук, доц., sherbatov2004@mail.ru,  
Астраханский государственный технический университет

## Многоагентная система планирования движения мобильного робота на основе искусственных силовых полей

*Рассмотрена двухуровневая архитектура многоагентной системы планирования движения робота в частично детерминированной среде на основе подхода с использованием искусственных силовых полей. Проведен критический анализ работ и показаны основные особенности применения теории искусственных силовых полей для управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями. Выявлены три основных недостатка, присущих существующим решениям, поставлена задача разработки многоагентной архитектуры планирования движения робота на основе искусственных силовых полей. Рассмотрены агенты, расположенные на двух уровнях архитектуры и обеспечивающие расчет воздействия искусственного силового поля, автоматический выбор маршрута, обнаружение и предотвращение столкновения с препятствиями. Траектория движения робота описывается с применением теории графов, а кратчайший путь на графе вычисляется по комбинированному алгоритму, объединяющему алгоритм построения диаграммы Вороного и алгоритм Дейкстры. Приведен расчетный пример, иллюстрирующий изложенный в работе подход. Разработанное программное обеспечение реализовано для автономного информационно-справочного комплекса.*

**Ключевые слова:** многоагентная архитектура, реактивный агент, генерирующий агент, искусственное силовое поле, мобильный робот, объезд препятствий

### Введение

Увеличение потребностей посетителей мест массового скопления людей (торговых центров, банков, аэропортов) в предоставлении качественных информационно-справочных и сервисных услуг предопределяет развитие удобных инновационных способов их предоставления. Такие задачи решаются за счет применения информационно-справочных комплексов на базе мобильных роботизированных платформ [1].

При этом крайне важной задачей является перемещение мобильного робота в частично детерминированной среде, где изначально известны координаты статических препятствий (стен, витрин и пр.). В местах массового скопления людей, как правило, существует необходимость объезда большого числа подвижных препятствий, т. е. маневрирования, и сопровождения человека до пункта назначения. Навигация в динамической среде предусматривает выбор базовой траектории и отклонение от нее для объезда препятствий с последующим возвратом на ту же траекторию.

Для объезда препятствий в реальном времени наиболее часто используется подход, который основан на том, что в случае обнаружения человека робот замедляется или останавливается и предупреждает человека об опасности столкновения. После этого робот продолжает движение по заданной траектории (при условии, что препятствие устранено). Например, в работе [2] описывается двух-

слойная технология навигации робота, объединяющая два метода: оффлайн-метод, прокладывающий маршрут на основе карты приоритетных объектов (наиболее посещаемых людьми мест); онлайн-метод, который сгенерированный путь адаптирует под статические и динамические препятствия. Однако в последнее время широкое распространение получил подход, который базируется на концепции искусственных силовых полей (ИСП).

### Особенности использования и современное состояние концепции силовых полей в задачах управления движением роботами

Для отклонения мобильной платформы от объектов можно использовать их силовые поля. Подобные модели [2–4], основанные на воздействии силового поля (рис. 1, см. третью сторону обложки), нередко являются эталонным решением для достижения своевременной реакции на динамически изменяющееся окружение. Однако многочисленные эксперименты показали, что такой подход малоэффективен из-за нескольких недостатков (например, силовые поля могут перекрываться и накладываться друг на друга) [4]. Робот будет двигаться по убыванию потенциала поля, создаваемого объектами и препятствиями, что может привести его в локальный минимум (пересечение окружностей силовых полей в одной точке). Проблема может быть решена путем внедрения акустических датчиков, но робот может настолько отклониться от базовой траекто-

рии, что это приведет его в тупик. Ситуация осложняется и тем, что у робота есть свои собственные конструкционные и кинематические ограничения, накладываемые на передвижение.

Одним из наиболее эффективных подходов для объезда препятствий является способ вычисления искусственной силы отталкивания, которая воздействует на робота со стороны препятствий, и силы притяжения со стороны цели [3, 5]. Данные силы суммируются для получения равнодействующей всех сил и используются для контроля движения робота. Подход на основе ИСП и аналогичные подходы имеют хорошо известные недостатки, например, обладают локальными антиградиентами целевой функции движения робота (например, при преодолении узкого прохода) [6]. Однако, если карта местности используется и для хранения данных от сенсорных датчиков очувствления [7], то можно с еще большей точностью вычислять вектор скорости движения (и конечную траекторию робота). В этом случае [3] большой набор данных от датчиков выражен в одном векторе силы, поэтому в качестве решения предлагается составление векторных гистограмм секторов. В данной концепции понятие "равнодействующая сил" подменяется понятием "точка минимума", по которым передвигается робот. Данный подход применим как для закрытых, так и для открытых пространств, а его преимущества описаны в работе [8].

Несмотря на большое число серьезных различий, можно выделить три общих недостатка отдельных разновидностей подходов на основе ИСП:

- локальные алгоритмы не в состоянии решить проблему препятствий, где робот сталкивается с затруднениями при навигации, например, узких проходов, переполненных коридоров или тупиков, в которых потребовалось бы задействовать глобальное планирование маршрута;
- предполагается, что робот — это материальная точка, что не позволяет учитывать реальные габаритные размеры платформы, а следовательно для каждого привода электромотора необходимо задавать свой вектор скорости. Это нетривиальная задача, поэтому требуется осуществлять плавную навигацию, учитывая геометрические и кинематические особенности робота;
- не предусматривается максимальное ограничение отклонения мобильной платформы от расчетного пути во время объезда препятствий, тем самым может возникать нежелательная ситуация в местах большого скопления людей, где роботу было бы уместным остановиться, предупредить людей и ждать.

Для решения первой проблемы существует класс подходов, комбинирующий традиционные алгоритмы планирования пути с алгоритмами на основе ИСП, которые не будут содержать минимумов (например, Motor Schemata [5] и навигационные шаблоны [9]). Данные алгоритмы позволяют вести

робота в режиме реального времени таким образом, что он не сталкивается с препятствиями.

Вторая проблема рассматривается в другом классе подходов. В работе [10] представлен метод скоростного изменения траектории (CVM), который предлагает решение проблемы оптимизации ограничения скорости движения робота в пространстве. Физические ограничения (скорость и ускорение) накладываются на поступательную и вращательные компоненты скорости робота. Робот сам выбирает скорость, которая удовлетворяет всем ограничениям и максимизирует целевую функцию, влияющую на скорость, безопасность движения и целенаправленность [11].

Для этих же целей применяется динамический подход, представленный в работе [11], который опирается на идею проведения локального поиска допустимых скоростей (DW) и позволяет роботу избегать препятствий во время движения. Для снижения вычислительной сложности алгоритма в определенном динамически сгенерированном пространстве, в центре которого расположен робот, принимаются во внимание те объекты, движение и скорость которых не прямолинейны. Теоретическое рассмотрение свойства сходимости описано в работе [12]. В работе [13] предложена схема ограничения скоростей (FVM), обобщение концепции DW, которая учитывает препятствия, форму роботизированной платформы, скорость и ускорение в целях осуществления навигации в переполненном препятствиями пространстве.

Методы CVM и DW способны вычислять плавные траектории движения с учетом кинематических ограничений, однако и в них есть проблема локальных минимумов (ее решение предложено в работе [14] путем введения этапа планирования). Задача объезда препятствий решается путем устранения проблемы нелинейного управления с обратной связью [15]. Траектория движения строится за счет контроля скоростного приближения к так называемой "виртуальной цели", которую необходимо отслеживать по пути следования [16, 17]. Объезд препятствия реализуется с помощью деформации виртуальной зоны, которая определяет зону безопасности вокруг роботизированной платформы (присутствие препятствия вызывает соответствующую реакцию среды). Сочетание пути следования со стратегией реактивного обхода препятствий имеет одно естественное ограничение, в котором обе концепции оказываются противоположные системные реакции. Эта ситуация приводит к локальному минимуму, где необходимо эвристическое переключение между стратегиями. Но проблема № 3 здесь не рассматривается.

Проблемы 1—3 комплексно рассмотрены в работах [18, 19], где планирование пути происходит в автономном режиме, после чего путь в реальном режиме пересчитывается с учетом сил, действующих со стороны препятствий. В частности, путь выбирается из набора однотипных (гомтопных)

перемещений, однако они представлены неявно, так как объем свободного пространства превышает максимально допустимое отклонение от маршрута. Во время выполнения алгоритмы реактивного управления используются для выбора допустимого варианта из множества однотипных путей, используя максимальное приближение к окружающей среде [3]. Понятие изменяющейся траектории рассматривается также и в работе [20], в которой текущий путь описывается как отображение координат действительных чисел в пространственную модель робота и может многократно пересчитываться в зависимости от координат препятствий. Подход был разработан для систем, имеющих сложные формы. Методы, основанные на изменении пути, способны избегать локальных минимумов, так как целостность пути сохраняется в процессе его изменения, и существует возможность задания максимально допустимого отклонения от маршрута. Однако они имеют высокие вычислительные требования по памяти, поскольку требуется запоминать множество альтернативных путей, либо изменять деформацию пути в режиме реального времени.

### Постановка задачи

С учетом вышесказанного требуется устранить указанные недостатки и обеспечить решение задачи планирования движения с использованием концепции ИСП. Пусть имеются геометрические размеры робота и препятствий.

*Упрощение.* Кинематические ограничения на перемещение робота отсутствуют.

Необходимо по заданным начальной позиции  $A$ , конечной позиции  $B$  и ориентации робота в пространстве построить траекторию движения (путь) от  $A$  до  $B$ , являющуюся непрерывной последовательностью позиций и ориентаций робота без столкновения с препятствиями. Тогда траекторию движения робота можно представить в виде неориентированного графа  $G(N, P)$ , вершинами которого являются контрольные точки (узлы траектории), а ребра — это доступные пути перемещения в пространстве (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Таким образом, задача исследования — синтез архитектуры системы планирования движения мобильного робота в частично детерминированной среде с динамическими препятствиями на основе концепции ИСП, обеспечивающей реализацию плавной траектории объезда препятствий и предотвращения столкновений.

### Архитектура многоагентной системы планирования движения

Двухуровневая архитектура многоагентной системы планирования движения представлена на рис. 3 (см. третью сторону обложки). Предполагается, что робот в каждый момент времени может

точно позиционироваться на основе подсистемы самолокализации с помощью лазерного дальномера.

В разработанной архитектуре присутствует как подсистема опроса датчиков, так и подсистема принятия решений. Каждая подсистема может быть представлена как составляющая многоагентной системы, использующей систему реального времени в качестве программной оболочки. Агенты (на рис. 3 обозначены  $A_1, \dots, A_7$ ) обмениваются информационными сообщениями (прямоугольники) с распределенной подсистемой, содержащей массивы данных и методы работы с ними, а также обмениваются данными между собой. Генерирующие агенты ( $A_1, A_2$ ) расположены на первом уровне архитектуры. Они создают последовательность действий (генерируют траекторию) для обеспечения перемещения робота и контролируют текущее отклонение от заданной траектории. Реактивные агенты ( $A_3, \dots, A_7$ ), расположенные на втором уровне, обеспечивают движение робота по сгенерированной траектории и действия по обеспечению безопасности перемещения.

### Генерирующие агенты

*Агент-построитель окружающего пространства* ( $A_1$ ) строит модель окружающей среды  $M$  (карту движения). На карте располагаются узлы  $N = \{n_i\}$ ,  $i = \overline{1, k}$ , где  $k$  — число узлов карты (характерные точки, например: центр комнаты, Т-образное пересечение, дверь, центр коридора и т. д.), относящиеся к ключевой информации конкретной области пространства. Карта строится на основе геометрического отображения множества точек  $S = \{s_j\}$ ,  $j = \overline{1, l}$ , где  $s_j$  — сегмент рабочего пространства, который определяется парой точек, а  $l$  — общее число сегментов. Упорядоченные сегменты позволяют определить расстояния не только между препятствиями и свободным пространством, но и вычислить границы свободной территории. Препятствия представляют собой ограниченные многоугольники, свободное пространство также ограничено. Следовательно, существует замкнутый полигон, состоящий из ломаных линий сегментов  $S$  карты  $M$ , где нет свободного пространства вне многоугольника.

Получение информации о топологии свободного пространства основано на методе построения диаграммы Вороного [21] и реализован в алгоритме № 1.

*Шаг 1.* Рабочее пространство представляет собой местность с произвольным разрешением  $z$  и делится сеткой  $g = \{m_r\}$ ,  $r = \overline{1, z}$ , где каждая ячейка помечена как свободное или занятое пространство.

Для отнесения ячейки к свободному (занятому) пространству решается тривиальная геометрическая задача. Выполняется проверка нахождения ячейки  $m_r$  внутри или снаружи полигона, ограниченного препятствиями и свободным пространством. Так как все полигоны замкнуты и состоят из упорядоченных сегментов, то эта задача решается путем проведения перпендикуляра через центр  $m_r$

и определения ближайшего сегмента, который пересекает линия (если линия не пересекает ни один из сегментов, то  $s_j$  не лежит в свободном пространстве). Далее  $s_j$  относится к свободному или занятому пространству в зависимости от того, где расположен центр ячейки  $m_r$  по отношению к  $s_j$ .

**Шаг 2.** Каждая ячейка сетки  $m_r$ , которая помещена как свободное пространство, является вершиной диаграммы Вороного тогда и только тогда, когда ее центр расположен на одинаковом расстоянии (приблизительно) от трех ближайших сегментов.

**Шаг 3.** Результирующие узлы  $n_i$  добавляются к маршруту  $R$  и отмечаются позицией соответствующей ячейки  $m_r$ .

**Шаг 4.** Для каждой пары вершин  $n_{i1}, n_{i2}, i1 \neq i2$  создается связь между ними только в том случае, когда через них можно провести прямую, не пересекающую ни один из сегментов на карте  $M$ .

*Агент-планировщик пути (A2)* предназначен для выбора траектории движения и позволяет роботу планировать и выполнять высокоуровневые задачи, такие как "Направляйся к отделу А", "Вызывай лифт" или "Перемести груз". Данные задачи, в зависимости от контекста текущих выполняемых процессов, могут быть разбиты на подзадачи, такие как "Подъехать к двери, открыть дверь", или на примитивные действия, например "Занять позицию  $(x_i, y_i, \theta_i)$ ". Когда агент A2 получает навигационное задание (например, позицию, которую нужно занять), выполняется *алгоритм № 2*.

*Алгоритм № 2* вычисляет кратчайший путь  $P$  для объезда препятствия.

**Шаг 1.** Пара узлов  $n_0$  и  $n_k$ , соответствующих начальной и конечной позиции, добавляется к пути  $P$ .

**Шаг 2.** Для каждой вершины  $n_i \in P: P \in R$  создается взаимосвязь между  $n_i$  и  $n_0$  (если возможно провести прямую, соединяющую  $n_i$  и  $n_0$ ) или между  $n_i$  и  $n_k$  (если прямую провести не удастся).

**Шаг 3.** Строится кратчайший путь  $P^*$  между вершинами  $n_0$  и  $n_k$ .

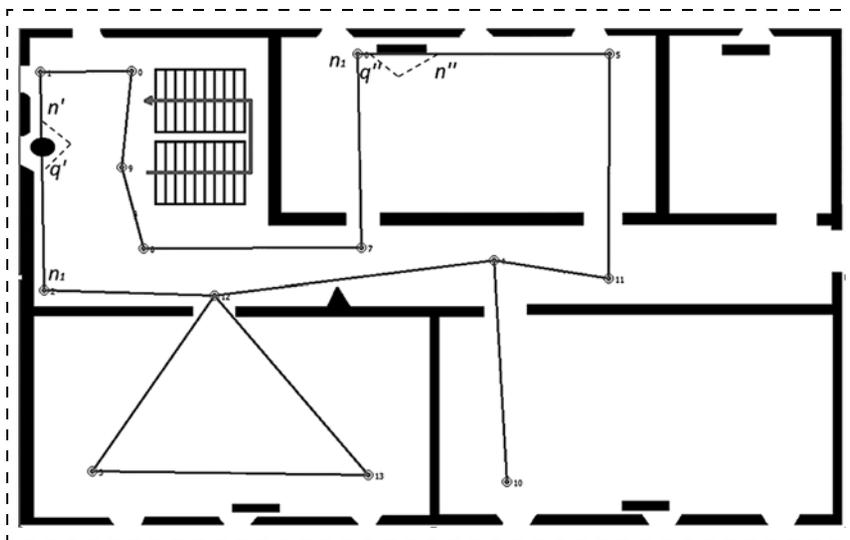


Рис. 4. Пример планирования траектории движения робота

*Агент-планировщик пути* получает информацию о последнем добавленном узле  $n_i$  (следующая точка на карте для посещения). Затем агент генерирует и сглаживает траекторию движения от текущей точки  $q' = (x'_b, y'_b, \theta'_b)$  к целевой  $q'' = (x''_b, y''_b, \theta''_b)$ , где  $\theta''_b$  может быть рассчитано или задано вручную для обеспечения минимального отклонения от целевой траектории. В текущем представлении функция контроля движения является прообразом биологического механизма и называется  $\xi$ -модель [22]. Гладкость траектории — фундаментальная характеристика. Поскольку существуют геометрические и кинематические ограничения, необходимо, чтобы *агент-планировщик пути* строил плавную траекторию с замкнутой обратной связью, вычисляя скорость движения и кривизну траектории в каждый момент времени (линейные и угловые значения скоростей). Агент A2 обеспечивает необходимой информацией реактивных агентов и не может предотвратить столкновение с препятствием.

### Реактивные агенты

Карта  $M$  используется для построения набора маршрутов  $R$  и для выбора узлов  $N$  при движении в условиях динамически изменяющейся среды на основе данных от сенсоров очувствления. Выделены следующие типы реактивных агентов, обеспечивающих движение робота.

*Агент-построитель локальной карты (A3)*, *агент-построитель силового поля (A4)* и *агент-безопасный навигатор (A5)* — это реактивные агенты, которые генерируют команды для объезда препятствий. На рис. 3 (см. третью сторону обложки) показаны два совмещенных объекта — *изображение* (экоцентрическое статико-динамическое представление среды, которое обновляется по показаниям сенсоров очувствления [23]), а также ИСП (сформированное на основе *изображения* и информации от датчиков [4]).

Агенты A3 и A4 на основании поступающих данных от сенсоров регулярно обновляют *изображение*, согласованное с реальным состоянием окружающей среды.

Агент A5 через равные интервалы времени (такт управления, значение задается вручную) выполняет виртуальную навигацию в ИСП (представление формируется в реальном масштабе времени), тем самым определяя безопасный сегмент траектории, которая позволяет роботу успешно избегать столкновения с препятствиями, продолжая движение к целевой точке.

*Агент-безопасный навигатор* получает информацию о  $n'_i$  от *агента-планировщика пути до целевого значения (A6)* и использует ее для вычисления нового узла в качестве конеч-

ной вершины безопасной траектории. Этот агент позволяет роботу на основе данных об ИСП и целевой точке обеспечить объезд препятствия. Пусть робот находится в положении  $q'$ , тогда агент А2 устанавливает  $n'$  в качестве текущей вершины. Агент А5 выполняет виртуальную навигацию в ИСП и в случае успеха устанавливает новую целевую точку  $n'$  (рис. 4).

Агент А6 вычисляет плавную траекторию движения до  $n'$ , и робот начинает движение по направлению к этой точке, которая может быть не достигнута в течение такта управления. Это обусловлено тем, что в следующий такт управления, когда робот будет в позиции  $q''$ , агент А5 вычисляет новую точку  $n''$ , которая передается агенту А6.

Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнута вершина  $n'$ . В то же время такой подход гарантирует гладкость траектории (за счет работы агента А2) и безопасность (так как агент А5 в реальном времени вычисляет свободную от препятствий траекторию в ИСП) [24].

Поскольку фактическая траектория робота отличается от виртуальной, сгенерированной в ИСП, то робот может столкнуться с объектами среды. *Агент предотвращения столкновения (А7)* исключает любой контакт с элементами окружающего пространства и подвижными препятствиями. В ситуациях, предшествующих столкновению, происходит отключение механизма плавной навигации и замедление либо останов двигателей. После этого робот поворачивается до тех пор, пока не будет найден свободный коридор и осуществлен повторный запуск механизма плавной навигации. Это позволяет безопасно объезжать препятствия даже в тех случаях, когда среда очень динамична, а другой робот или человек могут быстро приблизиться, не позволяя роботу маневрировать. Очевидно, что в таком случае траектория гладкой не будет.

### Расчетный пример

Многоагентная архитектура системы планирования движения реализована на базе роботизированной мобильной платформы MobileBot [1]. Для этого разработано программное обеспечение на языке Visual C#. Вершины графа определяются по алгоритму построения диаграммы Вороного исходя из ячеек свободного пространства (агент А1). После построения возможных путей перемещения мобильной платформы программа сохраняет в файл матрицу смежности вычисленного графа. Затем по алгоритму Дейкстры вычисляется кратчайший путь между целевыми вершинами. Рассмотрим расчетный пример, иллюстрирующий предложенный подход.

Предположим, граф  $G(N, P)$  имеет 10 вершин с координатами:  $A_1 = (162; 59)$ ;  $A_2 = (27; 58)$ ;  $A_3 = (32; 348)$ ;  $A_4 = (372; 347)$ ;  $A_5 = (786; 348)$ ;  $A_6 = (782; 34)$ ;  $A_7 = (448; 34)$ ;  $A_8 = (453; 292)$ ;  $A_9 = (164; 293)$ ;  $A_{10} = (165; 178)$ .

Матрица весов  $W$  графа  $G(N, P)$ :

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 134 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 109 \\ 134 & 0 & 288 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 288 & 0 & 339 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 339 & 0 & 416 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 416 & 0 & 321 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 321 & 0 & 320 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 320 & 0 & 253 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 253 & 0 & 286 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 286 & 0 & 120 \\ 109 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 120 & 0 \end{pmatrix},$$

где  $w_{i,j} = -1$  если ребра между вершинами  $i$  и  $j$  не существует;  $w_{i,j} \neq -1$  — расстояние между вершинами в пикселях изображения.

Пусть масштабный коэффициент преобразования значения расстояния в пикселях в сантиметры равен 1,36186770428016. По алгоритму Дейкстры (асимптотическая оценка  $O(n^2)$ ) вычисляется кратчайший путь между двумя вершинами графа, и информация об этом передается в программу планирования движения робота, которая формирует путь и преобразовывает его в последовательность команд. Агент А2 вычисляет необходимое свободное пространство для объезда роботом окружающих препятствий, после чего агент А5 формирует управляющее воздействие объезда препятствия, а агент А7 осуществляет мониторинг ситуации и при опасном сближении с динамическим препятствием останавливает мобильную платформу.

Путь между вершинами  $A_1$  и  $A_3$  приводится к следующей последовательности команд для робота:  $left(114.218)$ ;  $fwd(-316.893)$ ;  $right(60.2759)$ ;  $left(210.882)$ ;  $fwd(-321.636)$ ;  $right(228.894)$ ;  $fwd(-62.2415)$ .

При командах  $left$  и  $right$  мобильная платформа поворачивается на заданный угол (в градусах) влево (или вправо), команда  $fwd$  задает (в сантиметрах) движение на определенное расстояние.

Предложенная система была опробована на базе мобильного робота MobileBot под операционной системой ROS в учебном корпусе во время занятий, что позволило частично смоделировать трафик движения в торговом центре.

### Заключение

Рассмотренная архитектура при реализации для платформы MobileBot выявила один недостаток. Поскольку объезд препятствий зависит от ИСП, то имеют место локальные минимумы поля, что может препятствовать достижению целевого узла в случае, если стратегия выхода из минимума не сработала. В этом случае может возникнуть ситуация, при которой робот сильно отклонится от назначенной траектории во время поиска альтернативного решения. Устранение указанного недостатка — направление для дальнейших исследований в области

ти применения ИСП для планирования движения робота на основе предложенной многоагентной архитектуры.

#### Список литературы

1. Голубкин И. А., Кирилин С. А., Щербатов И. А. Принципы разработки мультимедийных прикладных роботизированных устройств // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 2. С. 153—157.
2. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // The International Journal of Robotics Research. 1986. V. 5 (1). P. 90—98.
3. Borenstein J., Koren Y. The vector field histogram—fast obstacle avoidance for mobile robots // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1991. V. 7 (3). P. 278—288.
4. Piaggio M., Sgorbissa A. AI-CART: an algorithm to incrementally calculate artificial potential fields in real-time // Proc. IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA '99. 1999. P. 238—243.
5. Koren Y., Borenstein J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1991. V. 2. P. 1398—1404.
6. Arkin R. C. Motor schema based mobile robot navigation // The International Journal of Robotics Research. 1989. V. 8 (4). P. 92—112.
7. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, Computer. 1989. V. 22 (6). P. 46—57.
8. Ulrich I., Borenstein J. VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1998. V. 2. P. 1572—1577.
9. Slack M. Navigation templates: mediating qualitative guidance and quantitative control in mobile robots // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1993. V. 23 (2). P. 452—466.
10. Simmons R. The curvature-velocity method for local obstacle avoidance // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1996. V. 4. P. 3375—3382.
11. Zhang F., O'Connor A., Luebke D., Krishnaprasad P. Experimental study of curvature-based control laws for obstacle avoidance // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '04. 2004. V. 4. P. 3849—3854.
12. Ogren P., Leonard N. A convergent dynamic window approach to obstacle avoidance // IEEE Transactions on Robotics. 2005. V. 21 (2). P. 188—195.
13. Damas B., Santos-Victor J. Avoiding moving obstacles: the forbidden velocity map // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009. P. 4393—4398.
14. Arras K., Persson J., Tomatis N., Siegwart R. Real-time obstacle avoidance for polygonal robots with a reduced dynamic window // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '02. 2002. V. 3. P. 3050—3055.
15. Lapierre L., Zapata R., Lepinay P. Simultaneous path following and obstacle avoidance control of a unicycle-type robot // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007. P. 2617—2622.
16. Aicardi M., Casalino G., Bicchi A., Balestrino A. Closed loop steering of unicycle like vehicles via lyapunov techniques // Robotics Automation Magazine. 1995. V. 2 (1). P. 27—35.
17. Soetanto D., Lapierre L., Pascoal A. Adaptive, non-singular path-following control of dynamic wheeled robots // Proc. 42nd IEEE Conference on Decision and Control. 2003. V. 2. P. 1765—1770.
18. Quinlan S., Khatib O. Elastic bands: connecting path planning and control // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1993. V. 2. P. 802—807.
19. Brock O., Khatib O. Elastic strips: a framework for motion generation in human environments // The International Journal of Robotics Research. 2002. V. 21 (12). P. 1031—1052.
20. Lamiraux F., Bonafous D., Lefebvre O. Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots // IEEE Transactions on Robotics. 2004. V. 20 (6). P. 967—977.
21. Sugihara K. Approximation of generalized voronoi diagrams by ordinary voronoi diagrams // CVGIP: Graphical Models and Image Processing. 1993. V. 55. P. 522—531.
22. Morasso P., Sanguineti V. Computational maps and target fields for reaching movements // Self-organization, Computational Maps, and Motor Control. Advances in Psychology. 1997. V. 119. P. 507—546.
23. Piaggio M., Sgorbissa A., Vercelli G., Zaccaria R. Fusion of sensor data in a dynamic representation // Proc. of the First Euro-micro Workshop on Advanced Mobile Robot. 1996. P. 10—16.
24. Ющенко А. С. К теории деятельности эргатических мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 3. С. 2—11.
25. Киселев Д. В., Ющенко А. С. Нечеткое управление движением мобильных роботов // Вестник МГУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2001. № 1. С. 86—99.
26. Киселев Д. В., Ющенко А. С., Вечканов В. В., Коротаев Ю. А. Система нечеткого управления конфигурацией шасси мобильного робота // Матер. 12-й науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. С. 119—130.
27. Тимофеев А. В., Юсупов Р. М. Принципы построения интегрированных систем мультиагентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами // Information Technologies & Knowledge. 2011. V. 5. N. 3. P. 237—244.
28. Васильев И. А. Построение карт для мобильного робота // Автоматизация в промышленности. 2011. № 12.
29. Картавцев К. В., Мелехова О. Н., Тимченко С. В. Модель детерминированной сети роботов // Доклады ТУСУР. 2010. № 1 (21).
30. Васильев И. А. Построение траекторий движения для колесного мобильного робота, снабженного лазерным сканирующим дальномером // Тр. XXI Междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". 2010.
31. Зенкевич С. Л., Минин А. А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 8. С. 5—12.

## Multi-Agent System for Detection of the Moving Obstacles and Movement Planning for the Mobile Robot Systems

P. V. Stepanov, stepanov.pavel.v@inbox.ru,

I. A. Shcherbatov, sherbatov2004@mail.ru,

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russian Federation

Received on May 26, 2014

*The topic of this article is an off-line movement system for the mobile robots. Its main goal is to ensure their movement from one point to another in a partially determined environment with static and mobile obstacles. Several systems are described. They are calculation of the impact of a potential force field, path assessment based on a neural network, avoiding collision system and a multi-agent system architecture for detection of obstacles and mobile robot control. The article presents mobile robot agents, which process data concerning the environment, communicate with each other and allow a robot to avoid the static and dynamic obstacles. Besides that, the most important task for a robot is movement in a partially determined environment, in which the obstacles' coordinates are unknown for the system. From a technical point of view, navigation in a dy-*

dynamic context is the next set of actions: a robot is given a certain trajectory from point A to point B and then it will be able to deviate from a certain route. The task is difficult because a mobile robot has its own design and kinematic restrictions. In crowded places there are many people. Consequently, there numerous moving obstacles to be avoided, i.e. the robot movement involves maneuvering and even escort of persons to the point of destination (department of a shopping center or museum exhibit). From a technical point of view, in order to avoid collision of a mobile platform with the objects their force fields can be used. The experimental results of the developed system are presented below.

**Keywords:** mobile robot, obstacle avoidance, potential force field, agent, multi-agent, actual and virtual robot movement

For citation:

**Stepanov P. V., Shcherbatov I. A.** Multi-Agent System for Detection of the Moving Obstacles and Movement Planning for the Mobile Robot Systems, *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 307–313.

DOI: 10.17587/mau.16.307-313

## References

1. **Golubkin I. A., Kirilin S. A., Shcherbatov I. A.** *Principy razrabotki mul'timedijnyh prikladnyh robotizirovannyh ustrojstv* (Principles of development of multimedia applications for robotic devices), *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika*, 2010, no. 2, pp. 153–157 (in Russian).
2. **Khatib O.** Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, *The International Journal of Robotics Research*, 1986, vol. 5 (1), pp. 90–98.
3. **Borenstein J., Koren Y.** The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, vol. 7 (3), pp. 278–288.
4. **Piaggio M., Sgorbissa A.** AI-CART: an algorithm to incrementally calculate artificial potential fields in real-time, *Proc. IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA '99)*, 1999, pp. 238–243.
5. **Koren Y., Borenstein J.** Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991, vol. 2, pp. 1398–1404.
6. **Arkin R. C.** Motor schema based mobile robot navigation, *The International Journal of Robotics Research*, 1989, vol. 8 (4), pp. 92–112.
7. **Elfes A.** Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, *Computer*, 1989, vol. 22 (6), pp. 46–57.
8. **Ulrich I., Borenstein J.** VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, vol. 2, pp. 1572–1577.
9. **Slack M.** Navigation templates: mediating qualitative guidance and quantitative control in mobile robots, *Proc. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1993, vol. 23 (2), pp. 452–466.
10. **Simmons R.** The curvature-velocity method for local obstacle avoidance, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, vol. 4, pp. 3375–3382.
11. **Zhang F., O'Connor A., Luebke D., Krishnaprasad P.** Experimental study of curvature-based control laws for obstacle avoidance, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '04)*, 2004, vol. 4, pp. 3849–3854.
12. **Ogren P., Leonard N.** A convergent dynamic window approach to obstacle avoidance, *Proc. IEEE Transactions on Robotics*, 2005, vol. 21 (2), pp. 188–195.
13. **Damas B., Santos-Victor J.** Avoiding moving obstacles: the forbidden velocity map, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, 2009, pp. 4393–4398.
14. **Arras K., Persson J., Tomatis N., Siegwart R.** Real-time obstacle avoidance for polygonal robots with a reduced dynamic window, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '02)*, 2002, vol. 3, pp. 3050–3055.
15. **Lapierre L., Zapata R., Lepinay P.** Simultaneous path following and obstacle avoidance control of a unicycle-type robot, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2617–2622.
16. **Aicardi M., Casalino G., Bicchi A., Balestrino A.** Closed loop steering of unicycle like vehicles via Lyapunov techniques, *Robotics Automation Magazine*, 1995, vol. 2 (1), pp. 27–35.
17. **Soetanto D., Lapierre L., Pascoal A.** Adaptive, non-singular path-following control of dynamic wheeled robots, *Proc. 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2003, vol. 2, pp. 1765–1770.
18. **Quinlan S., Khatib O.** Elastic bands: connecting path planning and control, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993, vol. 2, pp. 802–807.
19. **Brock O., Khatib O.** Elastic strips: a framework for motion generation in human environments, *The International Journal of Robotics Research*, 2002, vol. 21 (12), pp. 1031–1052.
20. **Lamiraux F., Bonnafous D., Lefebvre O.** Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots, *IEEE Transactions on Robotics*, 2004, vol. 20 (6), pp. 967–977.
21. **Sugihara K.** Approximation of generalized voronoi diagrams by ordinary voronoi diagrams, *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1993, vol. 55, pp. 522–531.
22. **Morasso P., Sanguineti V.** Computational maps and target fields for reaching movements, *Self-organization, Computational Maps, and Motor Control*, in: *Advances in Psychology*, 1997, vol. 119, pp. 507–546.
23. **Piaggio M., Sgorbissa A., Vercelli G., Zaccaria R.** Fusion of sensor data in a dynamic representation, *Proc. of the First Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robot*, 1996, pp. 10–16.
24. **Jushhenko A. S.** *K teorii dejatel'nosti jergaticheskikh mehatronnyh sistem* (On the theory of activity ergatic mechatronic systems), *Mehatronika*, 2000, no. 3, pp. 2–11 (in Russian).
25. **Kiselev D. V., Jushhenko A. S.** *Nechetkoe upravlenie dvizheniem mobil'nyh robotov* (Fuzzy motion control of mobile robots), *Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. Priborostroenie*, 2001, no. 1, pp. 86–99 (in Russian).
26. **Kiselev D. V., Jushhenko A. S., Vechkanov V. V., Korotaev Ju. A.** *Sistema nechetkogo upravlenija konfiguracij shassi mobil'nogo robota* (Fuzzy's control system of a mobile robot's chassis), *Proc. 12th Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, SPb.: Publishing house of SPbGTU, 2002, pp. 119–130 (in Russian).
27. **Timofeev A. V., Jusupov R. M.** *Principy postroenija integrirovannyh sistem mul'tiagentnoj navigacii i intellektual'nogo upravlenija mehatronnymi robotami* (Construction's principles of the integrated multi-agent system's navigation and intellectual control of mechatronic robots), *International Journal "Information Technologies & Knowledge"*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 237–244 (in Russian).
28. **Vasil'ev I. A.** *Postroenie kart dlja mobil'nogo robota* (Mapping for a mobile robot.), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2011, no. 12 (in Russian).
29. **Kartavcev K. V., Melehova O. N., Timchenko S. V.** *Model' determinirovannoj seti robotov. Part 1* (Model deterministic network's model of robots.), *Doklady TUSURa*, 2010, no. 1 (21) (in Russian).
30. **Vasil'ev I. A.** *Postroenie traektorij dvizhenija dlja koljosnogo mobil'nogo robota, snabzjonnogo lazernym skanirujushhim dal'nomerom* (Construction Trajectory's generating for wheeled mobile robot equipped with a laser scanning rangefinder.), *Proc. XXI Internat. Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2010 (in Russian).
31. **Zenkevich S. L., Minin A. A.** *Postroenie karty mobil'nyh robotov, osnashhennym lazernym dal'nomerom, metodom rekurrentnoj fil'tracii* (Mapping for mobile robot equipped with a laser range finder with method of recurrent filtering.), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2007, no. 8 (in Russian).

Corresponding author:

**Shcherbatov Ivan A.**, Ph. D., Associate Professor, shcherbatov2004@mail.ru, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russian Federation