

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения

Одним из актуальных направлений исследований в современной робототехнике является проблематика локальной навигации мобильных роботов (МР), обеспечивающей перемещение робота к цели с обходом препятствий в процессе движения. Процесс навигации включает в себя следующие этапы: составление карты внешней среды, локализация робота и планирование маршрута, ведущего к цели. К числу популярных методов локальной навигации роботов относится метод искусственных потенциальных полей (ПП). Суть метода ПП заключается в реализации движения МР в поле "информационных сил" с использованием сил "притяжения" к целевому положению и "отталкивания" от препятствий.

В работе рассматриваются вопросы локальной навигации и управления движением МР на основе метода ПП.

При использовании традиционных притягивающихся потенциальных полей структура виртуальных сил вблизи препятствия зависит от удаленности МР от цели, причем движение робота будет замедляться в конце маршрута, что неизбежно приведет к неоправданной задержке общего времени перемещения робота в целевое положение. Для устранения данного нежелательного эффекта авторами предложено использовать притягивающие потенциальные поля специального вида.

В методе ПП широко известна проблема локальных минимумов — потенциальных ям различной геометрической структуры, которые становятся ловушками для МР. Проведен анализ кинематических и динамических аспектов управления перемещением робота в рабочем пространстве. Авторами предлагаются новые методы ПП, позволяющие решать ключевые для управления МР проблемы "ловушек" (потенциальных ям) и обхода препятствий: метод двух карт потенциальных полей и метод "фарватера" на карте потенциальных полей.

Обсуждаются методы "жука", решающие задачу обхода препятствий в условиях отсутствия априорной информации о рабочем пространстве МР. Предложен модифицированный метод "жука", имеющий ряд преимуществ по сравнению с классическими методами.

Ключевые слова: мобильные роботы, локальная навигация, планирование движений, искусственные потенциальные поля, проблема локальных минимумов, задача обхода препятствий

*"Поле — это структура, в которой совершается поведение"
"Поскольку поведение является "полевым", то действия
управляются силами поля"*

К. Левин (K. Z. Lewin), Теория поля, 1936 г.

Введение

Одной из ключевых проблем мобильной робототехники является локальная навигация автономных мобильных роботов (МР) [1, 2], обеспечивающая их перемещение в неизвестной среде при выполнении сложных задач в различных областях науки и техники, включая военные и поисково-спасательные операции.

Локальная навигация занимается решением следующей группы задач: определение координат робота по отношению к некоторой (обычно стартовой) точке, локализация его в рабочем пространстве, планирование его маршрута перемещения к цели с предотвращением столкно-

вений с препятствиями (обходом препятствий) в процессе движения. Следует отметить, что планирование здесь задает лишь небольшой, локальный отрезок траектории, в конечной точке которого выбирается дальнейшая траектория.

Одними из наиболее популярных и широко распространенных методов локальной навигации МР в детерминированной (заранее определенной) статической среде являются *методы потенциального наведения*, основанные на использовании виртуальных (мнимых) сил притяжения к цели и отталкивания от препятствий, присущих потенциальным векторным полям. Общая идея данных методов состоит в движении МР вдоль линий векторного поля,

потенциальная функция которого отражает цель и конфигурацию препятствий. При этом силовые поля формально различаются по виду (однородное, перпендикулярное, тангенциальное, случайное, притягивающее, отталкивающее, комбинация притягивающего и отталкивающего и др.) и по типу потенциальной функции (виртуальное силовое поле, ньютоновское потенциальное поле, супербиквадратное потенциальное поле, гармоническое векторное поле и др.).

Среди методов потенциального наведения самым простым, имеющим низкую вычислительную сложность и высокую эффективность реализации, является метод потенциальных полей (ПП), который в литературе имеет следующие названия: метод "потенциалов" (potential field approach), метод "искусственных потенциальных полей" (artificial potential field), метод "полей виртуальных сил" (virtual force field), метод "гистограммы векторных сил" (vector field histogram) и др. Физическим аналогом искусственных ПП являются электрические поля с некоторым положительным зарядом для цели и отрицательным зарядом для препятствий.

Метод ПП в задачах навигации МР впервые был предложен А. К. Платоновым в 1970 г. [3]. За рубежом пионерскими являются работы Дж. Эндрюса (J. R. Andrews) и Н. Хогана (N. Hogan) [4], Р. Брукса (R. A. Brooks) [5], О. Хатиба (O. Khatib) [6]. Достаточно полное представление о современном состоянии метода и особенностях его применения в робототехнике дают работы [1, 2, 7–18]. Следует заметить, что сам архетип основной идеи метода движения в поле "информационных" (виртуальных) сил восходит к "теории поля" одного из виднейших гештальтпсихологов К. Левина (K. Z. Lewin), разработанной в 30–40-х годах прошлого столетия.

В настоящей статье, развивающей работы авторов [19–21], рассматриваются вопросы управления движением МР с использованием локальной навигации на основе метода ПП.

Основные положения метода потенциальных полей

Суть метода ПП заключается в реализации движения МР в поле "информационных сил" с использованием присущих потенциальным полям мнимых сил "притяжения" к целевой точке и "отталкивания" от препятствий.

Рабочим пространством МР, обозначаемым W , будем называть окружающее пространство, в котором он функционирует. Различают задачи планирования маршрута и планирования движений МР.

Маршрут — это непрерывная кривая в рабочем пространстве. Параметризованный временем маршрут называется траекторией, посредством ее дифференцирования можно вычислять скорости и ускорения МР, а ее нахождение называется *планированием* траектории или планированием движения.

Полагаем, что МР располагает картой окружающей среды и снабжен навигационной системой, позволяющей достаточно точно определять его вектор координат $\mathbf{q}$. Функциональная структура робота содержит модуль генерации потенциального поля $U(\mathbf{q})$, которое включается в его информационную базу и применяется в алгоритмах управления для вычисления виртуальных сил, обеспечивающих притягивание робота к цели или его отталкивание от заранее известных препятствий. При появлении новых препятствий на пути движения робота поле виртуальных сил оперативно обновляется.

Ограничимся рассмотрением плоской задачи: $W \subseteq \mathbf{R}^2$. МР рассматривается как материальная точка, движущаяся в потенциальном поле $U(\mathbf{q})$, образуемом суперпозицией двух полей — притягивающего (attracting), создаваемого целью, и отталкивающего (repelling), создаваемого препятствиями:

$$U(\mathbf{q}) = U_{att}(\mathbf{q}) + U_{rep}(\mathbf{q}). \quad (1)$$

Далее полагаем поле $U(\mathbf{q})$ дифференцируемым. Потенциальная сила в позиции $\mathbf{q} = (x, y)$ находится как антиградиент функции $U(\mathbf{q})$:

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = -\nabla U(\mathbf{q}),$$

где

$$\nabla U(\mathbf{q}) = \text{col} \left(\frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial x}, \frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial y} \right).$$

В соответствии с (1) создаваемую полем $U(\mathbf{q})$ виртуальную силу $\mathbf{F}(\mathbf{q})$ также можно разложить на две составляющие — притягивающую и отталкивающую:

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q}), \quad (2)$$

где

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{att}(\mathbf{q}), \quad \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{q}) = -\nabla U_{rep}(\mathbf{q}).$$

Равнодействующая виртуальная сила (2) как раз и используется для управления движением МР: она формирует итоговый вектор движения робота, направляя его перемещение к цели и предотвращая столкновения с препятствиями. Существуют три способа такого ее применения [14]:

- управляющий вход $\mathbf{u}$ робота формируется согласно закону

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}(\mathbf{q});$$

- в схеме *кинематического* управления силовое поле задает желаемую скорость движения робота:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}(\mathbf{q}); \quad (3)$$

- в схеме *динамического* управления робот рассматривается как массивная точка, на которую действует данная сила:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}(\mathbf{q}).$$

Реализация управляемого движения МР с использованием виртуальных ПП требует малых временных и вычислительных затрат, что крайне важно для решения задач управления МР в режиме реального времени.

Проблема построения потенциальных полей

Притягивающий потенциал. В качестве притягивающего потенциала обычно принимают параболическую функцию:

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} k_a [d(\mathbf{q})]^2, \quad (4)$$

где $k_a > 0$ — константа; $d(\mathbf{q})$ — евклидово расстояние МР до цели, которая считается расположенной в точке $\mathbf{q}_{goal}$:

$$d(\mathbf{q}) = \|\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}\|,$$

где $\|\cdot\|$ — евклидова норма вектора.

Отталкивающий потенциал. Отталкивающий потенциал должен быть большим вблизи препятствия и не должен влиять на движение МР вдали от него. Весьма распространен сле-

дующий способ задания отталкивающих потенциалов:

$$U_{rep}(\mathbf{q}) = \begin{cases} -\frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{q})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \rho(\mathbf{q}) \leq \rho_0; \\ 0, & \rho(\mathbf{q}) > \rho_0, \end{cases}$$

где $k_r > 0$, $\rho(\mathbf{q})$ — расстояние до препятствия; ρ_0 — ширина зоны действия сил в потенциальном поле, именуемая также радиусом безопасности препятствия. Таким образом, данное поле создает "потенциальный барьер" вокруг препятствия ширины ρ_0 , потенциал в котором резко возрастает при приближении к препятствию.

Следует отметить, что препятствия, как правило, описываются совокупностью "примитивов", таких как точка, прямая, эллипсоид, параллелепипед, конус, цилиндр и т. п. Чаще всего они представляются в виде окружностей (модель "сферического мира"), либо в виде многоугольников (модель "звездного мира").

Выбор структуры потенциального поля.

Поле (4) порождает потенциальные силы

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -k_a (\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}),$$

причем

$$\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q})\| = k_a \|\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}\|.$$

Отметим важную характеристику такого решения: формируемая сила притяжения существенно изменяется в процессе перемещения МР, и при приближении к цели она стремится к нулю, что приводит к двум нежелательным эффектам:

1) структура виртуальных сил (2) вблизи препятствия зависит от удаленности робота от цели;

2) движение робота будет замедляться в конце маршрута, что неизбежно приведет к неоправданной задержке общего времени его перемещения в целевое положение.

Для устранения данных нежелательных эффектов авторами предложено использовать притягивающие потенциальные поля другого вида [19–21]:

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} k_a d(\mathbf{q}). \quad (5)$$

В этом случае получаем притягивающую силу

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q}) = -k_a \frac{\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}}{d(\mathbf{q})},$$

абсолютная величина которой оказывается постоянной:

$$\|\mathbf{F}_{att}(\mathbf{q})\| = k_a.$$

Весьма эффективным может оказаться совместное использование потенциальных полей вида (4) и (5):

$$U_{att}(\mathbf{q}) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_a d(\mathbf{q})^2, & d(\mathbf{q}) \leq d_0; \\ \frac{1}{2} k_a d(\mathbf{q}), & d(\mathbf{q}) > d_0, \end{cases} \quad (6)$$

где d_0 — некоторое малое расстояние до цели.

Проблема "ловушек" и обхода препятствий

Локальность метода ПП часто делает его "близоруким" и неэффективным для достижения сложных целей. Дело в том, что имеется вероятность попадания МР в локальные минимумы — потенциальные ямы различной геометрической структуры, которые становятся для робота ловушками.

В кинематической схеме управления робот движется в направлении антиградиента поля, т. е. следует траектории градиентного спуска:

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = -\nabla U(\mathbf{q}(t)).$$

В точке локального минимума $\mathbf{q}^*$ градиент потенциальной функции обнуляется:

$$\nabla U(\mathbf{q}^*) = 0.$$

После попадания в точку минимума $\mathbf{q}^*$ робот остановится.

В динамической схеме управления имеем другую картину: набравший скорость робот, благодаря фактору инерционности, будет преодолевать мелкие потенциальные ямы. Для анализа данных схем уместно обратиться к опыту численного решения задач безусловной оптимизации невыпуклых целевых функций. В теории оптимизации разработаны различные методы поиска глобального минимума для таких функций, включая метод "тяжелого шарика", физическим аналогом которого является процесс скатывания шарика по наклонной поверхности. Если шарик тяжелый, то он будет проскакивать мелкие впадины по инер-

ции. Чем больше масса шарика, тем глубже могут быть впадины, которые он проскакивает при движении. Схема динамического управления роботом, очевидно, идентична данному методу, хотя и имеет принципиальное отличие — нам априори известна точка глобального минимума потенциального поля: $\mathbf{q} = \mathbf{q}_{goal}$. Также надо учитывать, что в реальных условиях функционирования робот испытывает действие сил сопротивления движению со стороны внешней среды.

Однако динамические схемы управления не гарантируют преодоление роботом глубоких потенциальных ям в процессе движения. Отметим характер траекторий движения робота, захваченных потенциальной ямой: в окрестности локального минимума он будет совершать возвратно-поступательное, либо циклическое движение по замкнутой кривой ("топтанье на месте", "биение траектории") и, следовательно, не сможет продолжить движение к цели.

Кстати, интересен исторический аспект развития метода ПП. В первых работах в этой области исследований траектория робота вычислялась в результате интегрирования дифференциальных уравнений движения второго порядка. Однако в ходе исследований было установлено, что фактор инерционности может приводить к неприемлемому виду траекторий вблизи протяженных препятствий — в результате многократных отталкиваний робота от препятствий его траектория становится чересчур "изрезанной". Вследствие этого в дальнейшем внимание исследователей переключилось на модели движения первого порядка.

Итак, проблема возникновения ловушек в потенциальных полях не может полностью решаться посредством применения простых моделей движения первого или второго порядка и указывает на необходимость усложнения алгоритмов управления МР. В связи с этим актуальными являются следующие две задачи:

- 1) диагностирование захвата траектории движения робота потенциальной ямой;
- 2) вывод робота из потенциальной ямы.

В случае применения схем кинематического управления ситуацию попадания МР в потенциальную яму можно диагностировать посредством оперативного контроля его траекторной скорости — ей отвечает случай, когда в процессе движения скорость оказалась ниже некоторого порогового уровня. В схемах динамического управления ситуация попадания в яму

диагностируется посредством обнаружения факта локализации траектории в некоторой ограниченной зоне рабочего пространства — для этого необходимо накапливать и обрабатывать данные наблюдения в течение некоторого скользящего интервала времени.

Авторами предлагаются два новых метода решения задач локальной навигации МР: метод двух карт потенциальных полей и метод "фарватера" на карте потенциальных полей, которые могут быть полезными для мобильной робототехники.

Метод двух карт потенциальных полей

В основу данного метода положена идея *раздельного* использования в алгоритмах управления двух карт потенциальных полей — $U(\mathbf{q})$ и $U_{rep}(\mathbf{q})$. Силовые линии первого и эквипотенциальные линии (изолинии) второго рассматриваются как аналоги навигационных изолиний на навигационных картах в судовождении, к примеру, магнитных меридианов и параллелей Земли.

Силовые линии поля $U(\mathbf{q})$ служат для прокладки маршрута движения МР. Изолинии отталкивающего поля описываются уравнением

$$U_{rep}(\mathbf{q}) = C, \quad C = \text{const} > 0.$$

Карта изолиний функции $U_{rep}(\mathbf{q})$ позволяет решать две задачи. Во-первых, контролировать ситуации сближения робота с препятствиями. Во-вторых, изолинии поля представляют информацию о геометрии препятствия и используются для построения пути обхода данного препятствия — робот при движении направляется вдоль изолинии и, следовательно, его движение подчиняется уравнению

$$\langle \dot{\mathbf{q}}, \nabla U_{rep}(\mathbf{q}) \rangle = 0,$$

где угловые скобки $\langle, \rangle$ обозначают скалярное произведение векторов.

Метод "фарватера" на карте потенциальных полей

Попытки построения стратегий управления МР, позволяющих обходить препятствия, преодолевать ловушки или выбираться из них,

наталкиваются на затруднения принципиального характера и, по-видимому, малопродуктивны. Тем не менее концепция ПП может быть полезна для решения задач навигации и маршрутизации МР.

Создадим силовое поле посредством суперпозиции потенциальных полей — создаваемого целью притягивающего поля и создаваемых препятствиями отталкивающих полей. Поскольку последние действуют локально, то в результирующем поле имеются силовые линии, обходящие препятствия и потенциальные ямы.

Силовой линией для векторного поля $\mathbf{F}(\mathbf{q})$ называется кривая в рабочем пространстве $\mathbf{r} = \mathbf{r}(s)$, где s — скалярный параметр, касательная к которой во всех точках кривой совпадает с вектором напряженности поля:

$$\frac{d\mathbf{r}}{ds} = \mathbf{F}(\mathbf{r}(s)).$$

Среди семейства всех силовых линий выберем линию $\mathbf{r}^*(s)$, которая отвечает двум требованиям. Во-первых, она заканчивается в целевой точке, т. е. вектор напряженности поля во всех точках линии отличен от нуля: $\|\mathbf{F}(\mathbf{r}(s))\| > 0$. Во-вторых, она является ближайшей к начальному положению МР $\mathbf{q}(0)$.

Силовая линия $\mathbf{r}^*(s)$ принимается в качестве заданного маршрута движения МР. Предлагаемый метод управления движением МР заключается в перемещении к данной силовой линии (возможно по наикратчайшему пути) и дальнейшем движении вдоль нее под действием силового поля. Данное решение задачи локальной навигации МР назовем *методом фарватера* на карте потенциальных полей по аналогии с понятием фарватера в морской навигации.

Модифицированный метод "жука"

Простейший способ обхода МР препятствий лежит в основе семейства методов "жука" (BUG-методы нахождения пути в движении), согласно которым робот движется по прямому пути к цели, огибая встречные препятствия и продолжая движение в том же направлении. Классические методы "жука" Bug1 и Bug2, предложенные в работе [22], получили развитие в различных модификациях [23]: DistBug, OneBug, DHBug, MRBug, LeaveBug, TangentBug, CautionsBug и др.

Согласно методу Bug1 МР следует по границе препятствия и непрерывно измеряет расстояние от своего текущего положения до цели. Совершив полный оборот вокруг препятствия, он возвращается к точке, имеющей минимальное расстояние до цели, и далее совершает движение в направлении к целевой точке. Основным недостатком метода Bug1 является необходимость полного обхода препятствия. В методе Bug2 предполагается частичный обход препятствия: при обнаружении препятствия МР также, как и в алгоритме Bug1, двигается вдоль границы препятствия, но при пересечении линии первоначального курса изменяет траекторию и далее двигается по ней к цели.

Методы Bug имеют следующие ограничения: препятствия должны находиться на ненулевом расстоянии друг от друга (не соприкасаться); робот рассматривается как материальная точка, которая может двигаться между препятствиями независимо от ширины прохода между ними; границы препятствий должны быть такими замкнутыми кривыми, чтобы любая прямая, проходящая через точки кривой и точку цели, пересекала ее ограниченное число раз.

В основу предлагаемого авторами метода обхода препятствий МР положено следующее правило: в свободном пространстве МР движется к цели по прямой линии с исключением эффекта самопересечения его траектории движения, т. е. процесса заикливания движения.

Линией визирования будем называть луч, соединяющий робот с целью, а точку траектории, в которой он изменяет направление движения, будем называть *точкой поворота*.

Предлагаемая схема обхода препятствий основана на следующих правилах:

1. Движение робота в свободном пространстве осуществляется по линии визирования цели.
2. Если робот подходит к препятствию в точке поворота q^+ , то он изменяет направление движения и двигается вдоль границы препятствия либо по часовой, либо против часовой стрелки.
3. Движение робота вдоль границы продолжается до момента достижения точки отхода q^- , в которой линия визирования цели направлена в свободное пространство и движение по ней гарантированно не пересекает пройденный путь. Такая точка именуется далее *разрешенной* точкой отхода.
4. Далее робот движется прямолинейно по направлению к цели.

Ключевым в данной схеме движения МР является способ определения точки отхода q^- . Здесь возможны два случая. В первом линия визирования не пересекает пройденный путь и данная точка является безусловно разрешенной. Во втором случае линия визирования пересекает пройденный путь, но при этом выполняется дополнительное условие, которое предлагается называть *правилом знаков*.

Для учета ориентации траектории движения МР введем следующие обозначения: локальные области слева и справа от траектории будем обозначать соответственно знаками "—" и "+". Без ограничения общности будем считать, что робот обходит препятствие против часовой стрелки, так что препятствие находится слева по ходу движения. В результате при движении по линии визирования робот может попасть на пройденный участок траектории лишь с ее стороны "+", так что движение по линии визирования разрешено, если она пересекает пройденный участок траектории только со стороны "—".

Данное правило поясняют рис. 1 и 2. Здесь левая сторона траектории представлена прилегающей пунктирной линией (соответствует знаку "—"). Стартовая позиция МР и цель обозначены соответственно S и G . PG — линия визирования цели.

Рис. 1 иллюстрирует ситуацию, когда движение по линии визирования запрещено, поскольку оно приведет к самопересечению траектории МР. Действительно, точка Q лежит на пройденном пути и попадание в нее означает заикливание движения МР. Напротив, в ситуации на рис. 2 сформулированное правило знаков разрешает движение по линии визирования.

Рис. 3 иллюстрирует процесс обхода препятствия согласно предложенному алгоритму. МР, двигаясь из положения S в направлении

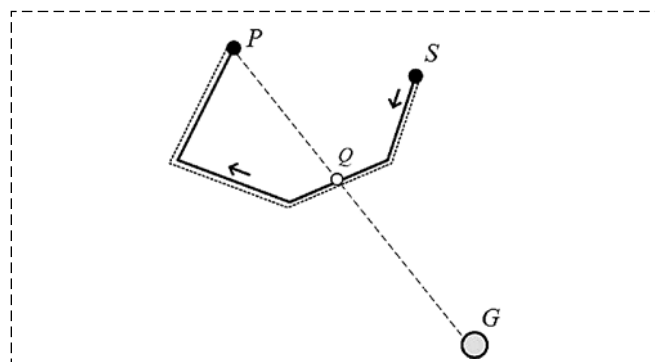


Рис. 1
Fig. 1

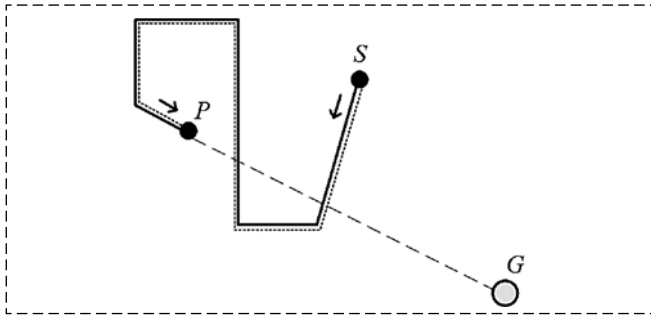


Рис. 2
Fig. 2

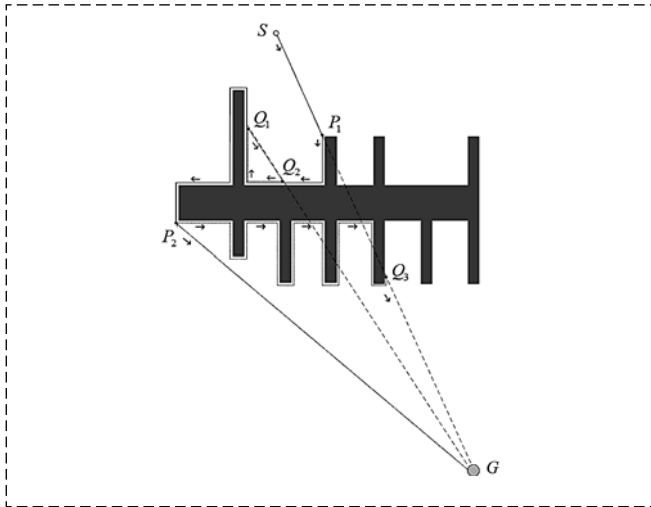


Рис. 3
Fig. 3

к цели G , подходит к препятствию в точке P_1 . Далее он движется вдоль края препятствия до разрешенной точки P_2 . К примеру, точка Q_1 не может быть точкой отхода от препятствия, поскольку дальнейшее движение приведет в точку Q_2 пройденного пути.

На том же рисунке показана траектория движения МР согласно классическому алгоритму "жука": робот доходит до точки Q_3 и далее движется по исходной линии визирования SG . Таким образом, предложенный алгоритм обхода препятствия может давать существенный выигрыш по критерию длительности движения к цели.

Важно отметить, что предложенный метод предполагает запоминание пройденного участка пути в процессе движения.

В общем случае, когда известна карта среды, но на пути движения МР возможны малоразмерные временные препятствия, можно объединить два предложенных метода: движение согласно методу фарватера и обход препятствия модифицированным методом "жука".

Заключение

Рассмотрены вопросы применения метода ПП в задачах локальной навигации МР. Исследованы вопросы построения притягивающих потенциальных полей. Затронута проблема локальных минимумов. Проведен анализ кинематических и динамических аспектов управления перемещением робота в рабочем пространстве. Предложены новые методы локальной навигации МР, позволяющие обходить препятствия при движении робота к цели: метод двух карт, метод "фарватера" на карте потенциальных полей и модифицированный метод "жука".

В предложенных методах окружающая среда рассматривается как статическая, т. е. препятствия и целевая точка неподвижны. Однако в реальных условиях окружающая среда часто является динамичной, препятствия и целевая точка могут изменяться. Предложенные методы ПП вполне могут быть преобразованы для их использования в динамической окружающей среде. Для этого достаточно использовать относительные скорость и положение робота по отношению к целевой точке в притягивающей потенциальной функции. При этом сам робот целесообразно представлять не точкой, а отрезком или прямоугольником, что позволит рассчитывать не только результирующую силу, действующую на робот, но и момент сил, т. е. управлять его ориентацией.

Список литературы

1. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 1. С. 15—58.
2. Zafar M. N., Montana J. C. Methodology for Path Planning and Optimization of Mobile Robots: A Review // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 133. P. 141—152.
3. Платонов А. К., Карпов И. И., Кирильченко А. А. Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР. М. 1974. № 124. 27 с.
4. Andrews J. R., Hogan N. Impedance Control as a Framework for Implementing Obstacle Avoidance in a Manipulator. Control of Manufacturing Process and Robotic Systems, Eds. Hardt D. E. and Book W. ASME. Boston. 1983. P. 243—251.
5. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // The International Journal of Robotics Research. 1985. Vol. 5 (1). P. 500—505.
6. Brooks R. A. A Robust Layered Control System for Mobile Roboton and Stereo Vision for Mobile Robots // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986. Vol. 2, No. 1. P. 14—23.
7. Al-Sultan K. S., Aliyu M. D. A New Potential Field based Algorithm for Path Planning // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1996. Vol. 17. P. 265—282.

8. Ge S. S., Cui Y. J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2000. Vol. 16. № 5. P. 615—620.
9. 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. М. 2001. № 40. 32 с.
10. Howard A., Mataric M. J., Sukhatme G. S. Mobile Sensor Network Deployment Using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage // Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems. Fukuoka, Japan, June 2002. P. 113—126.
11. Pozna C., Precup R.-E., Koczy L. T., Ballagi A. Potential Field-Based Approach for Obstacle Avoidance Trajectories // The IPSI BgD Transactions on Internet Research. 2002. Vol. 8, N. 2. P. 40—45.
12. Cosio F. A., Castaneda M. A. P. Autonomous Robot Navigation using Adaptive Potential Fields // Mathematical and Computer Modelling. 2004. Vol. 40. P. 1141—1156.
13. Fu-guang D., Peng J., Xin-qian B., Hong-jian W. AUV Local Path Planning based on Virtual Potential Field // In: 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2005. Vol. 4. P. 1711—1716.
14. Padilla Castaneda M. A., Savage J., Hernandez A., Arambula Cosío F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields. Motion Planning. Xing-Jian Jing (Ed.). Chapter 1. InTech, 2008. 598 p.
15. Чепиженко В. И. Анализ использования потенциальных полевых методов для решения навигационных и конфликтных задач // Кибернетика и вычислительная техника. 2012. Вып. 167. С. 15—24.
16. Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach // Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. 2013. P. 1314—1317.
17. Dumitru S. A., Vladareanu L., Yan T. H., Qi Ch. K. Mobile Robot Navigation Techniques Using Potential Field Method in Unknown Environments // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 656. P. 388—394.
18. Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р., Косенко Е. Ю. и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 300 с.
19. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Методология искусственных потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника — 2017. Матер. III Всероссийской научно-технической конференции. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 157—160.
20. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Некоторые аспекты применения метода потенциальных полей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XIX Международной конференции. Самара: ООО "Офорт", 2017. С. 242—247.
21. Filimonov A. B., Filimonov N. B. The Peculiarities of Application of the Potential Fields Method for the Problems of Local Navigation of Mobile Robots // Proceedings of the 14th International Scientifically Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2018. 2018. V. 1, Part 6. P. 208—211.
22. Lumelsky V., Stepanov A. Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape // Algorithmica. 1987. Vol. 2, N. 1-4. P. 403—430.
23. Ng J., Brauni Th. Performance Comparison of Bug Navigation Algorithms // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2007. Vol. 50, Iss. 1. P. 73—84.

Issues of Motion Control of Mobile Robots Based on the Potential Guidance Method

A. B. Filimonov, Dr. Sci. Tech., filimon_ab@mail.ru,
MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation,
N. B. Filimonov, nbfilimonov@mail.ru,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

*Corresponding author: Filimonov Nikolay B., Professor, Dr. Sci. Tech.,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation*

Accepted on July 12, 2019

Abstract

One of the topical areas of research in modern robotics is the problem of local navigation of mobile robots (MR), which ensures the movement of the robot to the target with the bypass of obstacles in the process of movement. The navigation process includes the following steps: mapping the environment, localization of the robot and planning the route leading to the goal. Among the popular methods of local navigation of robots is the method of artificial potential fields (PF). The essence of the PF method is to implement the movement of the MR in the field of "information forces" using the forces of "attraction" to the target position and the forces of "repulsion" from obstacles.

This article addresses the issues of local navigation and motion control of the MR based on the method of PF.

When using traditional attracting potential forces, the structure of virtual forces near the obstacle depends on the distance of the MR from the target, and the robot movement will slow down at the end of the route, which will inevitably lead to an unjustified tightening of the total time of moving the robot to the target position. To eliminate this undesirable effect, the authors propose to use attracting potential fields of special type.

The authors propose new methods of PF allowing to solve the key problems for the control of MR — "traps" (potential pits) and bypass obstacles: the method of two maps of potential fields and the method of "fairway" on the map of potential fields. The methods of "beetle" for solving the problem of bypass obstacles in the condition of the absence of a priori information about the working space of MR are discussed. A modified method of "beetle" having a number of advantages in comparison with classical methods is proposed.

Keywords: *mobile robots, local navigation, planning of movements, artificial potential fields, the problem of local minima, the problem of getting around obstacles*

For citation:

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Issues of Motion Control of Mobile Robots Based on the Potential Guidance Method, *Mechatronics, Automatization, Control*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 677—685.

DOI: 10.17587/mau.20.677-685

References

1. Liu W. Path planning methods in an environment with obstacles (a review), *Mathematics & Mathematical modelling*, 2018, no. 1, pp. 15—58 (in Russian).

2. Zafar M. N., Montana J. C. Methodology for Path Planning and Optimization of Mobile Robots: A Review, *Procedia Computer Science*, 2018, vol. 133, pp. 141–152.
3. Platonov A. K., Karpov I. I., Kirilchenko A. A. The method of potentials in the problem of track laying, *Preprint of the Institute of applied mathematics of the USSR Academy of Sciences*, Moscow, 1974, no. 124, 27 p. (in Russian).
4. Andrews J. R., Hogan N. Impedance Control as a Framework for Implementing Obstacle Avoidance in a Manipulator. Control of Manufacturing Process and Robotic Systems, Eds. Hardt D. E. and Book W, Boston, ASME, 1983, pp. 243–251.
5. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *The International Journal of Robotics Research*, 1985, vol. 5 (1), pp. 500–505.
6. Brooks R. A. A Robust Layered Control System for Mobile Roboton and Stereo Vision for Mobile Robots, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1986, vol. 2, no. 1, pp. 14–23.
7. Al-Sultan K. S., Aliyu M. D. A New Potential Field based Algorithm for Path Planning, *J. Intell. Robot. Syst.*, 1996, vol. 17, pp. 265–282.
8. Ge S. S., Cui Y. J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, vol. 16, no. 5, pp. 615–620.
9. Platonov A. K., Kirilchenko A. A., Kologanov M. A. The Potential Field Approach in the Path Finding Problem: History and Perspectives, *Preprint, Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science*, 2001, no. 40, 32 p. (in Russian).
10. Howard A., Mataric M. J., Sukhatme G. S. Mobile Sensor Network Deployment Using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage, *Proceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems*, Fukuoka, Japan, June 2002, pp. 113–126.
11. Pozna C., Precup R.-E., Koczy L. T., Ballagi A. Potential Field-Based Approach for Obstacle Avoidance Trajectories, *The IPSI BgD Transactions on Internet Research*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 40–45.
12. Cosio F. A., Castaineda M. A. P. Autonomous Robot Navigation using Adaptive Potential Fields, *Mathematical and Computer Modelling*, 2004, vol. 40, pp. 1141–1156.
13. Fu-guang D., Peng J., Xin-qian B., Hong-jian W. AUV Local Path Planning based on Virtual Potential Field, *2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2005, vol. 4, pp. 1711–1716.
14. Padilla Castaneda M. A., Savage J., Hernandez A., Arambula Cosío F. Local Autonomous Robot Navigation Using Potential Fields. Motion Planning. Xing-Jian Jing (Ed.). Chapter 1, InTech, 2008, 598 p.
15. Chepizhenko V. I. The Analysis of Use of the Potential Field Methods for the Solution of Navigation and Confluent Problems, *Cybernetics and Computerized Technology*, 2012, no. 1, pp. 15–24 (in Russian).
16. Li F., Tan Y., Wang Y., Ge G. Mobile Robots Path Planning Based on Evolutionary Artificial Potential Fields Approach, *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, 2013, pp. 1314–1317.
17. Dumitru S. A., Vladareanu L., Yan T. H., Qi Ch. K. Mobile Robot Navigation Techniques Using Potential Field Method in Unknown Environments, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 656, pp. 388–394.
18. Beloglazov D. A., Gajduk A. R., Kosemko E. Iu. etc. The Group Control by the Moving Objects in Indefinite Mediums. By edit. V. Kh. Pshikhopov, Moscow, PHYSMATLIT, 2015, 305 p. (in Russian).
19. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Methodology of artificial potential fields in the problems of local navigation of mobile robots. Intellectual systems, control and mechatronics, *The materials of the third All-Russian conference of the young scientist, post-graduates and students*, Sevastopol, Publishing house of Sev.SU, 2017, pp. 157–160 (in Russian).
20. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Some aspects of use of the potential fields method in the problems of local navigation of mobile robots. Control problems and simulation in complex systems, *The papers of XIX International conference. Samara. Sam SC RAS*, 2017, pp. 242–247 (in Russian).
21. Filimonov A. B., Filimonov N. B. The Peculiarities of Application of the Potential Fields Method for the Problems of Local Navigation of Mobile Robots, *Proceedings of the 14th International Scientifically Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2018*, 2018, vol. 1, part 6, pp. 208–211.
22. Lumelsky V., Stepanov A. Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape, *Algorithmica*, 1987, vol. 2, no. 1–4, pp. 403–430.
23. Ng J., Brauni Th. Performance Comparison of Bug Navigation Algorithms, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007, vol. 50, iss. 1, pp. 73–84.



25—27 мая 2020 г. в Санкт-Петербурге
на базе ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор" состоится

XVII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

Тематика конференции

- инерциальные датчики, системы навигации и ориентации;
- интегрированные системы навигации и управления движением;
- глобальные навигационные спутниковые системы;
- средства гравиметрической поддержки навигации.

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: + 7 (812) 499 82 10 + 7 (812) 499 81 57
Факс: + 7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru