

АНАЛИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ЖУКА В ЗАДАЧАХ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Филимонов А.Б.^{1,2}, Филимонов Н.Б.^{3,4}, Кожин М.А.³

¹*МИРЭА – Российский технологический университет;*

²*Московский авиационный институт (НИУ);*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;*

⁴*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*

Ключевые слова: автономные мобильные роботы, неизвестная среда, локальная навигация, методы жука, методы потенциальных полей, задача обхода препятствий.

Аннотация. Рассматривается задача движения автономных мобильных роботов в неизвестной среде. Обсуждается применение модифицированного метода жука в задачах локальной навигации мобильных роботов, представляющего собой комбинацию классических методов группы Bug и методов искусственных потенциальных полей. Представлены результаты компьютерной апробации метода в среде моделирования CoppeliaSim на языке Python.

ANALYSIS OF THE MODIFIED BEETLE METHOD IN THE TASKS OF LOCAL NAVIGATION OF MOBILE ROBOTS

Filimonov A.B.^{1,2}, Filimonov N.B.^{3,4}, Kozhin M.A.³

¹*MIREA - Russian Technological University;*

²*Moscow Aviation Institute (NRU);*

³*Lomonosov Moscow State University;*

⁴*Trapeznikov Institute of Control Problems, RAS, Moscow*

Keywords: mobile robots, unknown environment, local navigation, beetle methods, artificial potential fields, obstacle avoidance problem.

Abstract. The problem of movement of autonomous mobile robots in an unknown environment is considered. The application of the modified bug method in the problems of local navigation of mobile robots, which is a combination of classical methods of the Bug group and methods of artificial potential fields, is discussed. The results of computer testing of the method in the CoppeliaSim modeling environment in Python are presented.

Одним из актуальных направлений исследований в современной робототехнике является проблематика *локальной навигации* автономных мобильных роботов (МР), обеспечивающей движение робота к цели в неизвестной среде с обходом препятствий [1]. В докладе исследуются особенности применения в задачах локальной навигации МР модифицированного метода жука, предложенного в работе [2] и получившего развитие в работах [3, 4].

Модифицированный метод жука на карте потенциальных полей

Методы жука. К наиболее популярным методам локальной навигации движения МР в неизвестной среде относится семейство *методов жука* (Bug-методы) [5]. Согласно данным методам, направление движения МР определяется вектором градиента, обеспечивающем минимальный путь следования к цели с обходом препятствий и продолжением движения в том же направлении.

Классические Bug-методы 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.

Методы потенциальных полей. Другими популярными методами локальной навигации движения МР в среде с препятствиями являются методы искусственных *потенциальных полей* [6]. Согласно данным методам, предполагается, что цель движения МР имеет некоторый положительный заряд, создающий виртуальные силы «притяжения», а препятствия – отрицательный заряд, создающий виртуальные силы «отталкивания». В результате, в процессе движения МР под действием сил, присущих потенциальным полям, будет притягиваться к цели и отталкиваться от препятствий.

Основным недостатком методов потенциальных полей является вероятность попадания МР в локальные минимумы – потенциальные ямы различной геометрической структуры, которые становятся для робота ловушками, для выхода из которых требуется применение дополнительных эвристических правил.

В работах [2-4] предложен *модифицированный метод жука* локальной навигации МР, объединяющий идеи классических методов жука и методов потенциальных полей. В основу данного метода 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, причем скорость движения каждой точке определяется суперпозицией притягивающего и отталкивающего полей, создаваемых целью и препятствиями соответственно.

Локальная навигация модифицированным методом жука

Ограничимся рассмотрением плоской задачи движения МР, положение которого задается вектором \mathbf{r} и который рассматривается в виде отрицательно заряженной материальной точки, движущейся в потенциальном поле $U(\mathbf{r})$, образующимся суперпозицией двух полей – притягивающего (attracting) поля $U_{\text{att}}(\mathbf{r})$, создаваемого целью, и отталкивающего (repelling) поля $U_{\text{rep}}(\mathbf{r})$, создаваемого препятствиями:

$$U(\mathbf{r}) = U_{\text{att}}(\mathbf{r}) + U_{\text{rep}}(\mathbf{r}).$$

Антиградиентами полей $U_{\text{att}}(\mathbf{r})$ и $U_{\text{rep}}(\mathbf{r})$ являются потенциальные силы $\mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{r}) = -\nabla U_{\text{att}}(\mathbf{r})$ и $\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{r}) = -\nabla U_{\text{rep}}(\mathbf{r})$, равнодействующая виртуальная сила которых:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{r}),$$

как раз и используется для управления движением МР: она формирует итоговый вектор управляющего воздействия \mathbf{u} на исполнительные механизмы робота, задающего скорость и направление его движения к цели, предотвращая столкновения с препятствиями.

В основу алгоритма навигации МР модифицированным методом жука положены следующие правила *свободного движения и обхода препятствия*.

1. Движение МР в свободном пространстве осуществляется по линии визирования цели – лучу, соединяющему робот с целью.

2. Если робот подходит к препятствию на расстояние до точки поворота, не превышающее величины ρ_0^+ , то он начинает двигаться вдоль границы препятствия либо по часовой, либо против часовой стрелки.

3. Движение робота вдоль границы препятствия продолжается до достижения точки, удаленной от препятствия на величину, превышающую ρ_0^- , либо до приближения робота к цели при направлении линии визирования цели в свободное пространство.

4. Далее робот движется прямолинейно по направлению к цели.

Положим, что для МР заданы: радиус-вектор \mathbf{r}_g цели движения робота; вектор $\mathbf{d}_g(\mathbf{r}) = \mathbf{r}_g - \mathbf{r}$, соединяющий робот с целью; вектор $\mathbf{d}_o(\mathbf{r})$, соединяющий робот с ближайшим препятствием, возникающем на пути его следования.

Для определения величины и направления желаемого вектора скорости МР предлагается применить методологию потенциальных полей.

В качестве притягивающего потенциала принимается параболическая функция вблизи и линейная функция вдали от цели, порождающая следующую притягивающую потенциальную силу:

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{k_a}{\rho_g} \mathbf{d}_g(\mathbf{r}), & \|\mathbf{d}_g(\mathbf{r})\| \leq \rho_g, \\ k_a \frac{\mathbf{d}_g(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_g(\mathbf{r})\|}, & \|\mathbf{d}_g(\mathbf{r})\| > \rho_g, \end{cases}$$

где $\rho_g > 0$ – радиус области цели, внутри которой используется параболическая потенциальная функция; $k_a > 0$ – константа; а $\|\bullet\|$ – евклидова норма вектора.

В качестве отталкивающего потенциала принимается «потенциальный барьер» вокруг препятствия шириной ρ_r , именуемой его радиусом безопасности, потенциал которого резко возрастает при приближении к препятствию и который порождает следующую отталкивающую потенциальную силу:

$$\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}) = \begin{cases} -k_r \left(\frac{1}{\|\mathbf{d}_o(\mathbf{r})\|} - \frac{1}{\rho_r} \right) \frac{\mathbf{d}_o(\mathbf{r})}{\|\mathbf{d}_o(\mathbf{r})\|^3}, & \|\mathbf{d}_o(\mathbf{r})\| \leq \rho_r, \\ 0, & \|\mathbf{d}_o(\mathbf{r})\| > \rho_r. \end{cases}$$

где $k_r = \text{const} > 0$, ρ_r – константа, задающая ширину обхода зоны препятствий.

При отсутствии препятствий МР совершает свободное движение, и управляющее воздействие определяется притягивающей потенциальной силой:

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}_{att}(\mathbf{r}).$$

При наличии препятствий МР для избегания столкновений совершает их обход, и управляющее воздействие определяется суммой двух составляющих:

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{r}),$$

где $\mathbf{F}_{tan}(\mathbf{r})$ – тангенциальная сила, перпендикулярная к линии уровня потенциального поля препятствия, т.е. к вектору $\mathbf{d}_o(\mathbf{r})$, и определяется

выражением:

$$\mathbf{F}_{\text{tan}}(\mathbf{r}) = \left(-d_{o2} \frac{\|\mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{r})\|}{\|\mathbf{d}_o(\mathbf{r})\|}, d_{o1} \frac{\|\mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{r})\|}{\|\mathbf{d}_o(\mathbf{r})\|} \right),$$

где d_{o1} , d_{o2} – координаты вектора $\mathbf{d}_o(\mathbf{r}) = (d_{o1}, d_{o2})$.

Компьютерная апробация модифицированного метода жука

Для исследования модифицированного метода жука была создана среда моделирования движения МР в среде симулятора CoppeliaSim. Моделирование производилось для робота Pioneer3dx со скриптами на языке Python.

МР моделировался материальной точкой, не имеющей размеров и способной перемещаться в любом направлении с уравнением динамики вида

$$T\ddot{\mathbf{r}} + \dot{\mathbf{r}} = k\mathbf{u},$$

где $T=0,2$ и $k=1$ – постоянная времени и коэффициент усиления соответственно.

Были приняты следующие параметры зон цели и препятствий, а также потенциальных сил: $\rho_g = 0.6$, $\rho_o^+ = 0.8$, $\rho_o^- = 1.1$, $k_a = 0.6$, $k_r = 0.12$.

Проведен ряд вычислительных экспериментов имитационного моделирования движения МР с использованием исходного метода жука при обходе различных препятствий, некоторые результаты которых представлены на рисунках 1-3.

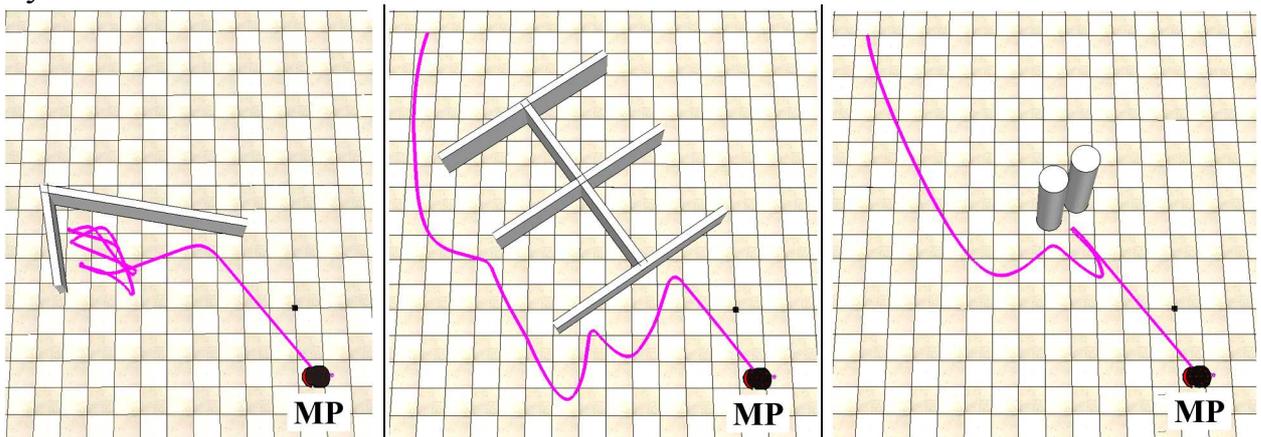


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 3

Здесь видны основные недостатки классического метода жука: возможность попадания МР в ловушку (рис. 1), не позволяющую продолжать движение к цели, а также не гладкость траектории движения (рис. 2, 3).

Выход из ловушки обеспечивается путем сравнения данных с противоположных датчиков МР: обнаружив ловушку, он начинает смещаться в сторону выхода из нее с помощью отталкивающей силы вдоль этого направления:

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}_{\text{tan}} + \mathbf{v}_{\text{rep}} \frac{\langle \mathbf{F}_{\text{rep}}, \mathbf{v}_{\text{rep}} \rangle}{\|\mathbf{v}_{\text{rep}}\|^2},$$

где \mathbf{v}_{rep} – вектор направления выхода из ловушки; угловые скобки \langle , \rangle – обозначают скалярное произведение векторов. Для большей гарантии выхода робота из ловушки следует в два раза уменьшить тангенциальную силу $\mathbf{F}_{\text{tan}}(\mathbf{r})$.

Повышение гладкости траекторий движения МР обеспечивается принятием равенства $\rho_r = \rho_0^-$ в выражении для потенциальной силы $\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{r})$ и использованием следующего отталкивающего воздействия:

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}_{\text{tan}} - \mathbf{F}_{\text{rep}} \frac{\langle \mathbf{F}_{\text{rep}}, \mathbf{v} \rangle}{\|\mathbf{F}_{\text{rep}}\| \|\mathbf{v}\|},$$

где \mathbf{v} – скорость робота в данный момент времени.

На рисунках 4-6 представлены результаты имитационного моделирования движения МР в среде с препятствиями с использованием модифицированного метода жука.

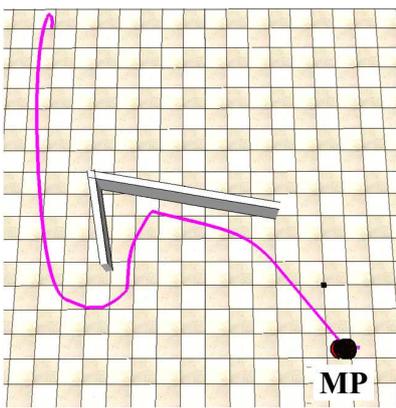


Рис. 4

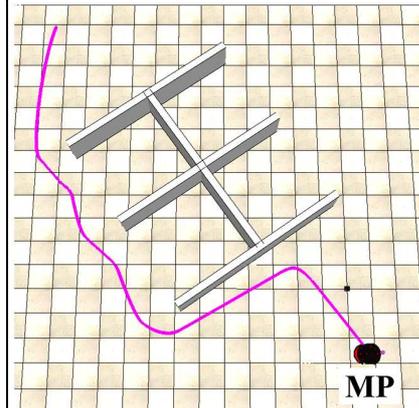


Рис. 5

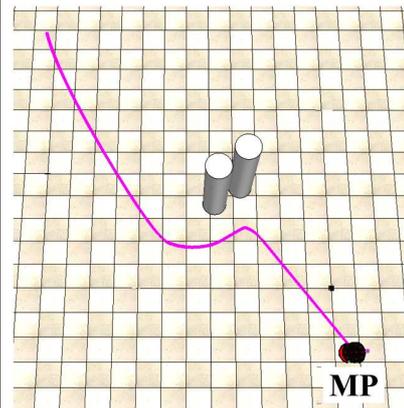


Рис. 6

Список литературы

1. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 1. С. 15-58.
2. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Два метода локальной навигации мобильных роботов в статических средах с препятствиями // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019). Т. 2. 2019. Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ. С. 105-107.
3. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Барашков А.А. Вопросы построения потенциальных пролей в задачах локальной навигации мобильных роботов // Автометрия. 2019. Т. 55, № 4. С. 65-70.
4. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Барашков А.А. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 11. С. 677-685.
5. Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S., Kantor G.A., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. Bug Algorithms. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations, MIT Press, Cambridge. 2005. P. 17-38.
6. 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. V. 1, Part 6. 2018. P. 208-211.

Сведения об авторах:

Филимонов Александр Борисович – д.т.н., профессор, МИРЭА–РТУ, МАИ (НИУ), Москва;

Филимонов Николай Борисович – д.т.н., профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова, гл. науч. сотр. ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, Москва;

Кожин Михаил Александрович – бакалавр, МГУ им. М.В. Ломоносова.