

УДК 519.63

## Компьютерное моделирование биомимитического закона отслеживания скрытых структур

Чеботарева В.Ю.

Научно-технологический Университет «Сириус»

*Аннотация:* В статье представлены результаты компьютерного моделирования алгоритма, вдохновленного биологическими системами. Мобильный робот типа автомобиля Дубинса перемещается по плоской поверхности с неизвестным скалярным полем. Робот оснащен двумя датчиками, измеряющими значения поля в текущем положении. Алгоритм направляет робота к точкам максимальных значений поля. В случае, когда эти точки образуют кривую, робот способен следовать этой кривой. В данной статье приведены результаты компьютерного моделирования данного метода. Моделирование подтверждает способность робота отслеживать структуру без оценки градиента.

*Ключевые слова:* мобильный робот, автономная навигация, компьютерное моделирование, отслеживание кривой.

### 1. Введение

Когда аргентинские муравьи движутся по феромонным тропам, они передвигаются с почти постоянной скоростью и регулируют свое движение с помощью поворотов, скорость которых ограничена [2]. Классической моделью такого поведения является так называемая машина Дубинса (1):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta, & \dot{\theta} &= u, & x(0) &= x_{in}, \\ \dot{y} &= v \sin \theta, & |u| &\leq \bar{u}, & y(0) &= y_{in}, & \theta(0) &= \theta_{in}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $x, y$  – это декартовы координаты характерной точки робота,  $v > 0$  – это постоянная скорость движения,  $\theta$  задает направление движения,  $u$  – это угловая скорость поворота, и  $\bar{u}$  – верхняя граница ее абсолютного значения. Модель (1) отражает способность робота следовать по любому пути с радиусом кривизны  $R = \frac{v}{u}$ , а также его неспособность справиться с большим искривлением. Управление формируется исходя из значений, полученных с датчиков.  $L$  – значения с левого датчика, а  $R$  – с правого. Робот выбирает поворот в сторону величины, которая является наибольшей среди  $L$  и  $R$ . В формировании выхода также участвует и стохастическая компонента, так что для более реалистичной модели добавляется случайное слагаемое  $\zeta$ . Тогда поведение робота также случайно, когда концентрации феромонов  $L$  и  $R$  почти равны между собой или обе равны нулю. Следующие формулы являются предположением биологов о том, как работает сенсорика муравьев [2]:

$$u = \bar{u} \cdot \text{sgn}(L - R), \quad (2)$$

$$L = \int P[r + R(\theta)\mathbf{z}]\mu_L(d\mathbf{z}) \quad R = \int P[r + R(\theta)\mathbf{z}]\mu_R(d\mathbf{z}), \quad (3)$$

где  $r$  – положение робота,  $z$  – локальные координаты датчика,  $L$  – значение поля слева,  $R$  – значение поля справа,  $\zeta$  – случайная компонента,  $P(x, y)$  – значение поля

в точке с координатами  $(x, y)$ ,  $R(\theta)$  – матрица поворота на угол  $\theta$ ,  $\mu_L(dz)$  и  $\mu_R(dz)$  – заданные конечные ненулевые меры Бореля.

Для моделирования поля, соответствующего данным критериям была взята формула (4),  $\sigma$  – параметр, характеризующий быстроту убывания поля по мере удаления от точек максимума,  $d$  – расстояние от точки  $r$  до отслеживаемой структуры, в качестве которой рассматривается кривая на плоскости.

$$P(x, y) = f(d) = e^{-\sigma \cdot d^2}. \quad (4)$$

## 2. Компьютерное моделирование

В тестах использовались параметры  $v = 0.6$  см/с и  $u = 0.6$  рад/с. Измерения поля зашумлены случайным сигналом, равномерно распределенным по интервалу  $[-0.1\diamond; 0.1\diamond]$ , где  $\diamond$  – единица измерения значения поля. Поле определяется по формуле (4),  $\sigma = 0.1$  см<sup>-2</sup>. Управление обновляется каждые 200 мс. Траектория робота и криволинейная структура изображены синим и оранжевым соответственно, начальное положение робота показано красным крестиком (рис. 1-3).

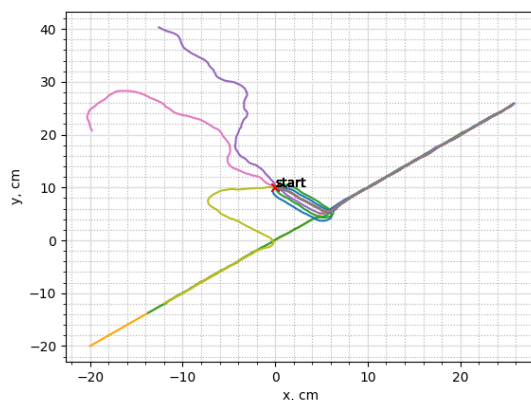


Рис. 1. Отслеживание структуры при разных начальных углах

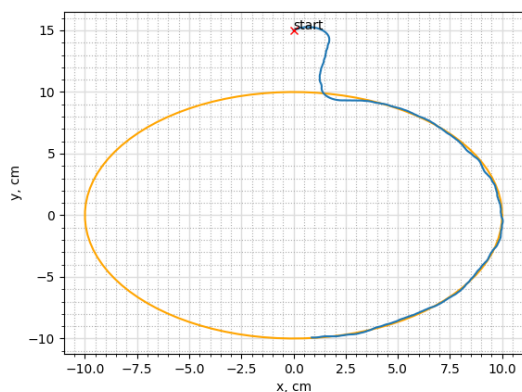


Рис. 2. Отслеживание окружности

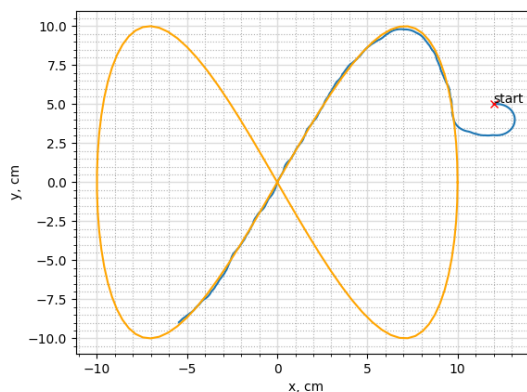


Рис. 3. Отслеживание фигуры Лиссажу

В первой серии экспериментов проверялась способность робота находить структуру при разном начальном направлении. Рис. 1 иллюстрирует структуру представленную прямой. Робот стартует из точки  $x = 0.0$  см,  $y = 10.0$  см, начальный угол  $\theta$

выбирался от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $45^\circ$ . Видно, что существуют такие начальные направления, из которых выйти на структуру роботу не удастся. Это можно объяснить тем, что робот находится на таком расстоянии от прямой, при котором в определенных начальных направлениях значения поля, измеряемые датчиками меньше, чем шум в датчиках. Из-за этого робот управляется только шумом. При этом при благоприятных углах роботу удастся выйти на структуру и отслеживать ее.

На рис. 2 изображена окружность радиуса 10 см с центром в начале координат; робот начинает с координатами  $x = 0.0$  см,  $y = 15.0$  см,  $\theta = 45^\circ$ . Несмотря на то, что робот в начальный момент направлен от окружности, ему удастся развернуться и двигаться в направлении структуры, после чего отслеживать ее. По сравнению с экспериментом, изображенным на рис. 1 начальная точка робота расположена ближе к структуре. Также, такое поведение робота можно объяснить наличием шумов в датчиках, которые могут помочь ему повернуть в нужном направлении, если значения в правом и левом датчиках примерно одинаковы.

В случае, представленном на рис. 3, криволинейная структура описана фигурой Лиссажу. Робот имеет следующие начальные координаты:  $x = 12.0$  см,  $y = 5.0$  см, начальный угол  $\theta = 0^\circ$ . Как и в предыдущем случае роботу удастся развернуться по направлению к фигуре и отслеживать ее из-за близкого расположения начальной точки к структуре. Интересно, что даже несмотря на имеющееся самопересечение фигуры Лиссажу, робот отслеживает структуру и не сбивается с пути.

### 3. Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты демонстрируют способность закона навигации успешно находить и отслеживать кривые, образованные точками максимума поля. Закон находит почти оптимальные пути к структурам. Эксперименты показали, что успешность применения метода зависит от начальных условий, в частности от начального угла робота. В будущем предполагается улучшить закон управления и обеспечить его сходимость при любых значениях начального угла ориентации.

### Литература

1. Матвеев А., Минюк Е., Гусев С., Шепеляевый А. Навигация неголономных роботов, вдохновленная поведением муравьев, для поиска экстремумов в окружающей среде и отслеживания скрытых путей без использования градиента // 8-я Международная конференция по робототехнике и инженерии автоматизации (ICRAE). IEEE, 2023. С. 159–164.
2. Аморим П., Тьерри Г., Перуани Ф. Модель навигации муравьев, основанная на законе Вебера // Журнал математической биологии. 2019. 78. С. 943–984.
3. Денебур Ж.-Л., Арон С., Госс С., Пастелс Жак М. Самоорганизующийся исследовательский паттерн аргентинского муравья // Журнал поведения насекомых. 1990. 3. С. 159–168.

MSC 68T40

## Computer Simulation of a Biomimetic Law for Tracking Hidden Structures

V. Chebotareva

Sirius University of Science and Technology

*Abstract:* The article presents the results of computer simulations of an algorithm inspired by biological systems. A mobile robot of the Dubins-car type moves on a flat surface with an unknown scalar field. The robot is equipped with two sensors that measure the field values at their current positions. The algorithm directs the robot to the points of maximum field values, and in the case where a curve of maximum values is formed, the robot is capable of following this curve. The article includes the results of computer simulations of this method, confirming the robot's ability to track the structure without gradient estimation.

*Keywords:* mobile robot, autonomous navigation, computer simulation, curve tracking.

### References

1. Matveev A., Minuk E., Gusev S., Shepeljavyi A. Ants-inspired non-gradient based navigation of non-holonomic robots for environmental extremum seeking and tracking hidden paths // 8th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). IEEE, 2023. P. 159-164.
2. Amorim P., Thierry G., Peruani F. An ant navigation model based on Weber's law // Journal of Mathematical Biology. 2019. 78. P. 943–984.
3. Deneubourg J -L., Aron S., Goss S., Pasteels Jacques M. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant // Journal of insect behavior. 1990. 3. P. 159–168.