# Реактивный алгоритм достижения роботом подвижной цели на сцене с движущимися и деформирующимися препятствиями.

Николаев М. С., студент кафедры теоретической кибернетики СПбГУ,

maksimnikolayev@gmail.com

## Аннотация

Предложен и проанализирован новый алгоритм движения робота к движущейся цели в априори неизвестной среде с динамическими препятствиями. Рассматривается перемещение на плоскости, препятствия претерпевают движения общего вида, включая вращения и деформации, цель управления — за конечное время достичь цель через часть плоскости, свободную от препятствий. Предложенный алгоритм использует данные о текущем направлении на цель и панорамную картину текущей сцены до ближайшего препятствия, непосредственно преобразует текущие сенсорные данные в текущее управляющее воздействие в духе рефлексоподобной реакции и характеризуется низкой вычислительной сложностью. Сходимость алгоритма в сложных динамических сценах, насыщенных препятствиями, продемонстрирована с помощью компьютерного моделирования.

## Введение

Способность к безопасному автономному движению в априори неизвестной и изменяющейся сцене является одним из основных требований к мобильным роботам. Несмотря на длительные интенсивные исследования в данной области, этот вопрос до сих пор остается во многом открытой алгоритмической проблемой. В последнее время фокус исследований по робототехнике сместился в сторону простых и универсальных робототехнических платформ «общего назначения». К их преимуществам относятся возможность использования в различных приложениях, простота обслуживания и производства, низкая стоимость, экономное энергопотребление. К недостаткам относятся ограниченные ресурсы: энергетические, вычислительные, сенсорные и коммуникационные. Как следствие возникает повышенный интерес к ресурсосберегающим алгоритмам автономной навигации и управления, обеспечивающим достижение цели при подобных ограничениях. Важный класс таких алгоритмов образуют методы локального планирования движения, которые с одной стороны, опираются на локальные и минимальные сенсорные данные о сцене и с другой стороны, являются реактивными, то есть непосредственно преобразует текущие сенсорные данные в текущее управляющее воздействие.

В данной работе предложен и исследован с помощью компьютерного моделирования новый алгоритм такого рода. Алгоритм нацелен на обеспечение постоянного приближения к цели при соблюдении безопасности движения робота. Эта парадигма влечет ряд ограничений, смысл которых сводится к тому, что робот, имея лишь ограниченные знания о форме и положении препятствий, должен иметь возможность их огибания без отдаления от цели. С технической точки зрения это требование обеспечивается рядом ограничений на соотношение между скоростью робота и максимальной скоростью точек препятствий и цели, форму препятствий и расстояния между препятствиями.

## Постановка задачи и предположения

Движущийся в плоскости робот $R(t)$ управляется вектором скорости $\bar{v}$, длина которого не превышает фиксированной величины $v > 0$. Сцена содержит конечное число подвижных и деформирующихся непроходимых препятствий $O_1(t), O_2(t), \dots, O_N(t)$ и цель $T(t)$. При этом скорость точек препятствий не превышает $v_o \geq 0$, а скорость цели не превышает $v_t \geq 0$. Задача состоит в достижении роботом цели за конечное время, при этом, в любой момент времени робот должен находиться вне препятствий $R(t) \notin \bigcup_i O_i(t)$. Робот измеряет текущее направление на цель, а также расстояние до ближайшего препятствия по любому направлению (панорамное зрение).

Предполагаем, что препятствия в процессе движения не пересекаются, не разделяются на части и не приближаются к цели на расстояние, меньшее некоторой фиксированной величины $r_0 > 0$; максимальный угловой размер препятствий относительно цели в любой момент времени не превышает фиксированного угла $\varphi_{max} < \pi$.

Довольно естественным является также требование определенной степени разреженности сцены. Для его формулировки назовем *шапкой* $i$-го препятствия с параметром $\alpha > 0$ множество $H_i(\alpha)$ всех точек плоскости вне этого препятствия, для которых угловые расстояния между направлением на цель и оба видимых края $i$-го препятствия не меньше $\alpha$, но меньше $\pi$. *Расширенной шапкой* $\widehat{H}_i(\alpha)$ назовем объединение шапки $H_i(\alpha)$ и самого $i$-го препятствия. В качестве меры разреженности используется минимальный угол $\alpha_{min}$ такой, что расширенные шапки препятствий $\widehat{H}_i(\alpha_{min})$ попарно не пересекаются в любой момент времени.

## Описание алгоритма

В работе рассматривается движение робота, при котором он постоянно приближается к цели. Последнее означает, что угол между вектором скорости робота и направлением на цель в любой момент времени должен быть меньше 90 градусов. В этой связи к параметрам алгоритма относится максимальной угол, на который может отклоняться вектор скорости от направления на цель, этот угол естественно меньше $90°$.

Алгоритм использует следующие параметры:

- $\beta \in (0, \pi/2)$ — максимальный угол, на который вектору скорости робота разрешено отклоняться от направления на цель;
- $\alpha_{min}$ — значение угла, при котором шапки препятствий $H_i(\alpha_{min})$ попарно не пересекаются в любой момент времени;
- $k := (v_o + v_t)/(v - v_t)$ — отношение максимальной скорости препятствия к минимальной скорости робота в системе отсчета, связанной с целью.

Предполагаем, что $k < 1$.

Для описания алгоритма введем дополнительные определения.

Будем описывать данные сенсорной системы функцией $\rho(\varphi)$, $\varphi \in [-\pi, \pi]$, сопоставляющей углу отклонения луча зрения от направления на цель расстояние до точки отражения данного луча от препятствия(которое, вообще говоря, может быть и бесконечным). При этом возрастание угла соответствует движению луча зрения вправо. Данная функция естественным образом разбивается на отрезки непрерывности, называемых в дальнейшем *гранями* препятствия, которые соответствуют пробеганию луча зрения по границе некоторого препятствия. При этом, точки разрыва данной функции мыслятся как *края* окружающих препятствий. Отметим сразу, что возможна ситация, при которой на некотором интервале функция $\rho(\varphi)$ сплошь бесконечна, в этом случае она также полагается непрерывной на данном интервале. Напомним, что $\varphi = 0$ соответствует направлению на цель.

Назовем $\varphi \in [-\pi, \pi]$ *левым краем*, если $\rho(\varphi - 0) < \rho(\varphi)$ и *правым краем*, если $\rho(\varphi) > \rho(\varphi + 0)$. Предполагаем, что робот начинает движение в позиции, не принадлежащей объединению расширенных шапок всех препятствий, и используем обозначение

$$\mu := \max\{\alpha_{min}, \arcsin k\}.$$

Алгоритм состоит в следующем:

- Если робот находится вне объединения упомянутых шапок, то
  - на промежутке $[-\mu, \pi]$ ищется ближайший левый край $\varphi_l$ : $\rho(\varphi_l) = \min\{\rho(\varphi) \mid \varphi$ — левый край$\}$, а на промежутке $[-\pi, \mu]$ аналогично ищется ближайший правый край $\varphi_r$. Если на каком то из указанных интервалов нет таких краев, то они полагаются равными $-\mu$ и $\mu$ соответственно;
  - Для каждого из этих углов определяется левый и правый курсовые углы $\beta_{l,r}$ по формуле

    $$\beta_{l,r} = \begin{cases} 0, & \delta\varphi_{l,r} \leq -\arcsin k \\ \dfrac{\delta\varphi_{l,r} + \arcsin k}{\alpha_{min} + \arcsin k}\,\delta\beta, & -\arcsin k < \delta\varphi_{l,r} \leq \alpha_{min}, \end{cases}$$

    где $\delta = 1$ для $\beta_r$ и $-1$ для $\beta_l$;
  - Если $\varphi_r < \varphi_l$ (что условно соответствует ситуации прохода между препятствиями), то за курсовой угол $\beta_c$ берется больший по модулю из этих углов, в противном случае — меньший;
  - После этого проводится анализ окрестности робота, а именно, диска малого фиксированного радиуса $r_{crit} \geq 0$ с центром на роботе. Как только в ней появляется точка некоторого препятствия, $\beta_c$ переопределяется и выбирается как меньший по модулю угол из $\{\beta_{crit} - \arcsin k, \beta_{crit} + \arcsin k\}$, где $\beta_{crit}$ — направление на данную точку. При этом, автоматически выполняется $|\beta_c| \leq \beta$.
- Как только робот прибывает на границу шапки некоторого препятствия, что характеризуется касанием одного из краев этого препятствия границы интервала $[-\alpha_{min}, \alpha_{min}]$, робот начинает

движение в сторону данного касания, поддерживая угол $\beta$ между вектором скорости и направлением на цель до момента выхода из шапки, двигаясь таким образом по логарифмической спирали.

## Компьютерное моделирование.

Моделирование сцены проводилось в среде MATLAB. Сенсорная система измеряла расстояния до препятствий вдоль 60-ти равномерно распределенных лучей. В качестве препятствий рассматривались отрезки различной длины.

Было проделано несколько серий экспериментов с различными сценариями. При этом, в основном исследовались случаи, формально не соответствующие сформулированным ограничениям на скорость препятствий и цели. Несмотря на это, а также на несовершенство сенсорной системы, алгоритм обеспечил достижение цели во всех случаях.

Рассмотрим подробно один из проделанных экспериментов. Начальное расположение робота, цели и препятствий указано на рис. 1.

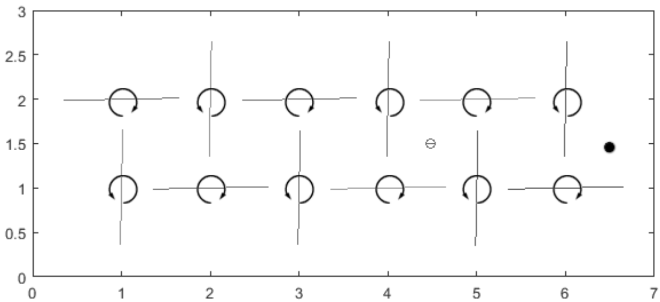


Рис. 1: $v = 1,\ v_t = 0.5,\ v_o = 0.4$

Робот, движущийся со скоростью 1 стартует из точки $(6.5, 1.5)$ и стремится достичь цель, которая стартует из точки $(4.5, 1.5)$ и движется равномерно влево со скоростью $v_t = 0.5$. Препятствия представляют собой вращающиеся отрезки, максимальная скорость точек которых достигается на концах и равна $v_o = 0.4$. Направление вращения отрезков показаны на рисунке.

Дополнительной трудностью для достижения цели является то, что цель способна проходить сквозь препятствия, в отличие от робота. Движение робота показано на рис. 2-3, на рис. 4 робот достигает цели.

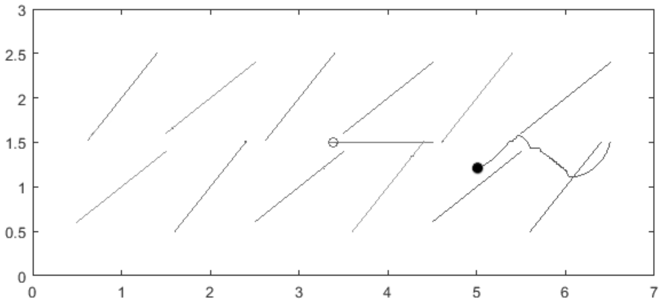


Рис. 2: Движение робота

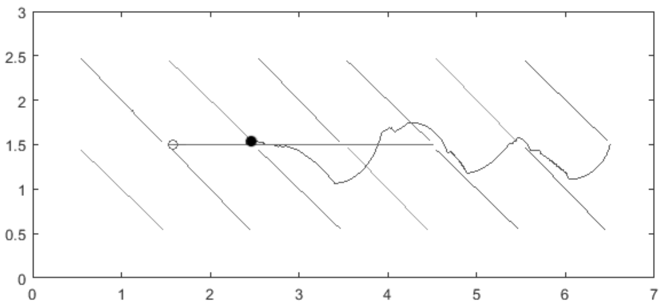


Рис. 3: Движение робота

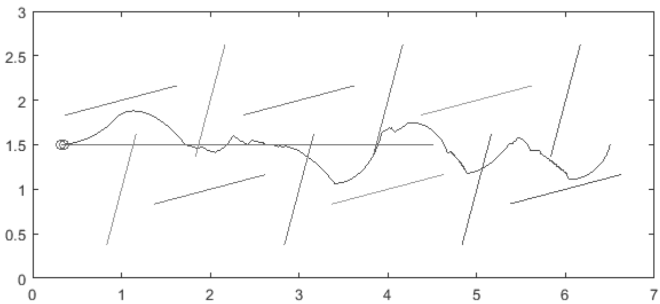


Рис. 4: Робот достиг цель

## Заключение

В работе был предложен реактивный алгоритм для достижения роботом подвижной цели на сцене с подвижными и изменяющимися препятствиями.

## Литература

[1] Alexey S. Matveev, Michael C. Hoy, Andrey V. Savkin, A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles, Automatica, Volume 54, April 2015, Pages 292-304