

Д. С. Яковлев, аспирант, yakovlevds@bmstu.ru, А. А. Тачков, канд. техн. наук, нач. отдела, tachkov@bmstu.ru,
НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием

Рассмотрена задача оценки вероятности столкновения с препятствием автономного мобильного робота, выполняющего движение по спланированной траектории. Проведены обзор и анализ методов решения данной задачи. Показано, что рассмотренные методы базируются на использовании периодически обновляемых клеточных карт проходимости (сеток занятости). Разработан новый метод оценки вероятности столкновения мобильного робота с препятствием, базирующийся на использовании клеточной вероятностной карты, в каждой ячейке которой хранится значение оценки вероятности нахождения в ней препятствия, и условной вероятности накрытия клеток карты с учетом возможных боковых и угловых отклонений мобильного робота от спланированной траектории (координатного закона накрытия клетки), обусловленных динамическими характеристиками системы управления движением. Для построения вероятностной карты использована динамически обновляемая многослойная карта проходимости, в которой каждый слой, за исключением результирующего, заполняется данными от классификаторов внешней среды, обрабатывающих информацию от информационно-измерительной системы мобильного робота. Результирующий слой представляет собой результат байесовского вывода по данным остальных слоев. Система управления движением автономного мобильного робота обеспечивает построение многослойной карты проходимости, карты вероятностей нахождения препятствий, определение координат робота, планирование траектории, контроль за следованием робота по ней и вычисление вероятности столкновения с препятствием.

Выполнена программная реализация разработанного метода оценки вероятности столкновения мобильного робота с препятствием в виде встраиваемого модуля в среде ROS (Robot Operating System). Приведено описание натурных экспериментов с мобильным роботом при возникновении на пути его следования перемещаемого препятствия. Приведены результаты анализа изменения вероятности столкновения робота с препятствием, и дана интерпретация результатов экспериментов. Обоснована необходимость вычисления вероятности столкновения мобильного робота с препятствием для оценки риска как основного показателя безопасности системы управления движением. Дана оценка результатам данной работы в решении задачи обеспечения безопасности движения автономных мобильных роботов.

Ключевые слова: автономность, безопасность движения, вероятность столкновения с препятствием, обеспечение безопасности, мобильный робот, система управления движением, риск, аварийная ситуация

Введение

Проблема обеспечения безопасного движения мобильных роботов (МР) является весьма актуальной в последнее десятилетие. Это связано, в первую очередь, с разработкой беспилотных транспортных средств, которые должны функционировать в городской среде. В работах, посвященных данной проблеме, как правило, анализируются риски возникновения аварийных ситуаций при движении беспилотных средств на общественных дорогах [1–9]. В работах [3–6] под "аварийной ситуацией" понимается столкновение мобильного робота с другими объектами окружающей среды. Чтобы избежать таких столкновений, МР должен уметь определять форму препятствий и их местоположение. Для динамических препят-

ствий дополнительно требуется определение и предсказание скорости и направления их движения на основе кинематической модели [1]. Такое предсказание осуществляется с использованием данных от информационно-измерительной системы (ИИС), которые, как правило, содержат случайные ошибки. В связи с этим многие исследователи в области безопасности движения МР прибегают к использованию вероятностного подхода для определения местоположения препятствий [9] и предсказания их движения на основе статистических данных [5]. Вероятностный подход особенно эффективен в случае применения МР или беспилотных средств на общественных дорогах, для предсказания поведения других участников движения [6, 10], а также для моделирования возникновения аварийной ситуации [4].

В работе [11] был проведен анализ методов оценки и обеспечения безопасности МР и сделан вывод о целесообразности ее количественной оценки на основе вероятностного подхода. В качестве количественной оценки было обосновано применение показателя безопасности — риска возникновения аварийной ситуации с участием мобильного робота [12]:

$$R = PW, \quad (1)$$

где P — вероятность возникновения аварии (столкновения с препятствием), W — ущерб от попадания мобильного робота в аварию.

На основе анализа значения риска R принимается решение о необходимости осуществления маневра МР для предотвращения столкновения с препятствием. Например, в случае превышения предельного значения риска $R > R_{\max}$ мобильному роботу необходимо переходить в режим экстренного торможения. Как видно из формулы (1), показатель риска зависит от вероятности P столкновения с препятствием и ущерба W от этого столкновения.

Ущерб W возникает только после наступления события "столкновение с препятствием" и зависит, например, от скорости МР, угла между вектором его скорости и препятствием, скорости движения препятствия, а также других существенных обстоятельств столкновения.

Таким образом, для определения риска необходимо знать оценку вероятности возникновения аварии, поэтому настоящая работа посвящена методу определения вероятности столкновения мобильного робота с препятствием.

Постановка задачи

Задача определения вероятности столкновения МР с препятствием рассматривается в следующей постановке. Мобильный робот перемещается в ограниченной области $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ по спланированной траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, $t \in [0, T]$. Модель движения робота задана системой дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0,$$

$\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ — вектор состояний робота, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ — вектор управления, $\mathbf{x}_0(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ — вектор начальных состояний робота при $t = 0$.

В области Ω имеются $k = 1, \dots, K$ дискретных препятствий, координаты $\omega^{(k)} = (\omega_x^{(k)}, \omega_y^{(k)}) \in \Omega$ которых оцениваются с помощью ИИС мо-

бильного робота. Часть препятствий $M \leq K$ могут быть динамическими. Расположение k -го препятствия задается распределением вероятности $p_k(\omega)$ его координат, что позволяет учесть изменение в результате любого возможного движения в интервале времени $[0, \dots, T]$ и смоделировать неопределенность в измерениях ИИС. Также принимается допущение, что расположение двух препятствий взаимно независимо, что следует из условия независимости проводимого наблюдения и обнаружения препятствия с помощью ИИС.

Необходимо найти вероятность $P(t)$ столкновения робота с любым из K препятствий.

Методы определения вероятности столкновения с препятствием

Существует ряд подходов к определению вероятности столкновения робота с другими объектами окружающей среды: с помощью моделирования поведения объектов на основе марковских процессов [6, 10], предсказание поведения участников движения на основе вероятностных моделей [4], на основе анализа карты окружающей среды [13, 14].

Следует заметить, что перечисленные подходы базируются на дискретном представлении (замощении) области Ω одинаковыми квадратами (клетками) со стороной h , при этом каждая клетка ω_{ij} и ее координаты (i, j) неразличимы, а пересечение клеток может осуществляться только по ребрам [15]:

$$\begin{aligned} \Omega_h &= \{\omega_{ij} \mid (i, j) \in I_h \subset \mathbb{Z}^2, \mu(\omega_{ij} \cap \omega_{kl}) = \\ &= \emptyset, (i, j) \neq (k, l), \Omega \subseteq \bigcup_{(i,j) \in I_h} \omega_{ij}\}, \\ \Omega_h &= \bigcup_{(i,j) \in I_h} \omega_{ij}, \end{aligned}$$

где $\mu(\omega_{ij} \cap \omega_{kl})$ — условие попарного непересечения клеток в области Ω_h .

Такое представление является базовым для построения карт проходимости, или сеток занятости [14], которые используются для определения вероятности столкновения робота с препятствиями. В карте проходимости каждая клетка, как правило, принимает дискретное значение. Например, в работе [16] предложено использование карты $Osc(\omega_{ij})$, в которой каждая ячейка ω_{ij} находится в одном из двух состояний: "занята" ($\omega_{ij} = 1$) или "не занята" ($\omega_{ij} = 0$). $Osc(\omega_{ij})$ используется для построения

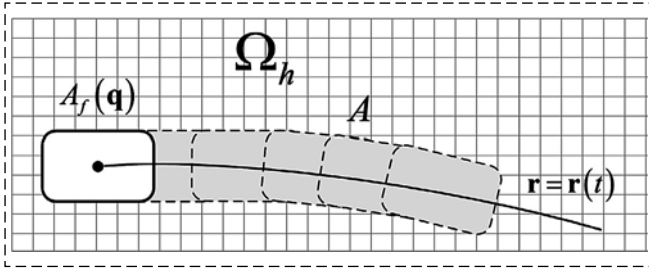


Рис.1. Движение робота по траектории
Fig. 1. Mobile robot's trajectory movement

карты, в каждой ячейке которой содержится значение вероятности $P(\omega_{ij} = 1)$ нахождения ячейки ω_{ij} в состоянии "занята". На основе подобной, но периодически обновляемой, карты $M(t)$ в работе [13] рассматривалась задача определения вероятности столкновения МР как со статическим P_{cs} , так и динамическим P_{cd} препятствием. Предполагается, что определено конфигурационное пространство \mathcal{C} МР (совокупность значений всех его обобщенных координат: положение и ориентация робота) как специальная евклидова группа $SE(2)$ [16], компактная область $A_f(\mathbf{q}) \subset \Omega_h$, занимаемая роботом (рис. 1), $\mathbf{q} \in \mathcal{C}$. Область A , которую занимает робот при движении по траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ за интервал времени $\tau = t_2 - t_1$, определяется как

$$A = \bigcup_{t \in [t_1, t_2]} A_f(\mathbf{r}(t)), A \subset \Omega_h.$$

Тогда, согласно работе [13] вероятность столкновения P_{cs} со статическим препятствием ищется как

$$P_{cs} = \max_A (P(\omega_{ij} = 1)).$$

Для вычисления вероятности столкновения P_{cd} с динамическим препятствием m в работе [13] вводится понятие области o_m потенциального взаимодействия между роботом и препятствием (рис. 2, а, см. третью сторону обложки).

Вероятность столкновения с динамическим препятствием в момент времени t аппроксимируется вероятностью

$$P_{cd}(o_m) = P(o_m(t) \cap A \neq \emptyset, \forall t \in [t_1, t_2]),$$

$$P_{cd}(o_m) = \sum_{n=1}^N w_{mn} [P_{cd}(o_m, n) + P_{ps}(o_m, n)(1 - P_{cd}(o_m, n))],$$

где $P_{ps}(o_m, k) = \int_A PS(o_m(t))$ — вероятность попадания робота в область препятствия (круг

радиусом 1,2 м); $PS(o_m(t))$ — модель области препятствия с центром в o_m ; $P_{cd}(o_m, n) = \int G(o_m(t), \mu_n, \Sigma_n)$ — вероятность столкновения с препятствием, движущимся по шаблону n ; $G(o_m(t), \mu_n, \Sigma_n)$ — гауссовский процесс, представляющий движение препятствия по одному из возможных шаблонов n (шаблон n — одна из моделей движения препятствия, составленная с учетом собранных статистических данных); w_{mn} — вес шаблона n для препятствия m ; μ_n — математическое ожидание; Σ_n — ковариация; N — число всех возможных шаблонов движения препятствия m .

Вероятность l -го перехода робота в область o_m равна $PZ_l = \max_A (g_{C_l, S_l}(\omega_{ij}))$, где $g_{C_l, S_l}(\omega_{ij})$ — двумерная гауссова функция для клетки ω_{ij} с ковариационной матрицей S_l и центром пространства o_m в точке C_l (рис. 2, а, см. третью сторону обложки). При этом вероятность столкновения с динамическим препятствием за все время движения робота определяется как

$$P_{cd} = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{cd}(o_m)) \prod_{l=1}^L (1 - PZ_l).$$

Полная вероятность столкновения с любым возможным препятствием во время движения робота вычисляется по формуле

$$P_c = P_{cs} + (1 - P_{cs})P_{cd}. \quad (2)$$

Таким образом, появляется возможность оценить вероятность столкновения робота со статическими препятствиями на основании построенной на момент оценки карты окружающей среды робота. Переменным элементом карты являются динамические объекты, для вычисления вероятности столкновения с которыми предлагается проводить предсказание их движения на основании наблюдений за их поведением.

Как отмечается в работе [5], многие алгоритмы планирования предлагают N вариантов траекторий движения. При наличии K препятствий в зоне действия робота вычислительная нагрузка при оценке вероятности по формуле (2) равняется $O(NK)$. Авторы работы [5] предлагают подход, вычислительная нагрузка которого будет равняться $O(N + K)$. Для оценки вероятности столкновения с препятствием в работе [6] вводится ограничение $\bar{P}_D \leq P_D = P_c$, которое для точечных препятствий вычисляется как $\bar{P}_D = \int \sum_{k=1}^K p_k(\omega)$.

Для всего набора препятствий K в рабочем пространстве робота, занимающего множество точек $B_k \subset A$ (рис. 2, б, см. третью сторону обложки), вычисляется $G(\omega) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{S_{B_k}} I_{B_k}(\omega) * p_k(\omega)$

(где S_{B_k} — площадь области, занимаемой множеством точек B_k ; $I_{B_k}(\omega)$ — индикатор множества B_k ; $f(\omega) * g(\omega)$ — свертка функций в клетке ω), для препятствий $B_k \subset A$ выделяется ограничивающий контур $\partial B_{k,\sigma}(\omega) = \nabla g_\sigma(\omega) * I_{B_k}(\omega)$ и вычисляется $\partial G_\sigma(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \partial B_{k,\sigma}(\omega) * p_k(\omega)$ (где $g_\sigma(\omega)$ — нормализованная двумерная функция Гаусса). Для каждого пути из N вычисляется $\partial A_\sigma(\omega) = \nabla g_\sigma(\omega) * I_A(\omega)$ вокруг A . Вероятность столкновения робота с препятствием оценивается как $F_D \geq \bar{P}_D \geq P_D$:

$$F_D = \int_{A_k} \partial A_\sigma(\omega) \partial G_\sigma(\omega) + \int_{A_k} I_A(\omega) G(\omega),$$

где $I_{A_k} \leq \frac{1}{2} \partial A_\sigma * \partial \tilde{B}_{k,\sigma} + \frac{1}{S_{B_k}} I_A * \tilde{I}_{B_k}$ — индикатор расширенной суммой Минковского области A (рис. 2, б, см. третью сторону обложки).

Необходимо учитывать тот факт, что оценка вероятности столкновения робота с препятствием в рассмотренных работах проводится на основе анализа построенной до начала движения карты статических препятствий окружающей среды. Таким образом, робот движется по априори известной карте, неопределенность в которой составляют только динамические препятствия. Также общим в рассмотренных выше подходах является поиск оценки вероятности столкновения на этапе планирования траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, без анализа возможного отклонения робота от этой траектории во время его движения, которая характеризуется динамической ошибкой системы управления робота.

Предлагаемый нами метод оценки вероятности столкновения с препятствием в отличие от рассмотренных имеет два ключевых отличия:

- для анализа препятствий в каждый момент времени t применяется динамически обновляемая многослойная карта проходимости, каждый слой которой заполняется отдельными классификаторами ИИС и характеризуется своей матрицей правдоподобия, что позволяет получать более достоверную оценку вероятности нахождения препятствия в клетке ω_{ij} ;
- учитываются возможные отклонения МР от спланированной траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$.

Определение вероятности нахождения препятствия в заданной клетке карты на основе многослойной карты препятствий

Многослойной картой в момент времени t , по аналогии с рассматриваемым в работе [15] "ландшафтом", будем называть множество классов клеток определенного подмножества покрытия

$$\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl) = \{(c_{ij}, s) | c_{ij} = c(t, \omega_{ij}, s), \\ \omega_{ij} \in \Omega_h, s = \overline{0, lr}, lr \in \mathbb{N}\},$$

такого, что функция $c(\cdot)$ принимает на $\{\omega_{ij} | i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ не более cl значений, причем к классу b принадлежит N_r клеток, т. е. $\sum_{b=1}^{cl} N_b = |\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl)|$. Карта $\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl)$ образована $(lr + 1)$ -клеточной плоскостью: результирующим слоем $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl) = \{(c_{ij}, 0) | c_{ij} = c(t, \omega_{ij}, 0), \omega_{ij} \in \Omega_h\}$ и слоями $\mathcal{L}_s(\Omega_h, cl)$, которые формируются независимо работающими классификаторами внешней среды на основе данных ИИС:

$$\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl) = \mathcal{L}_0(\Omega_h, cl) \cup \bigcup_{s=1}^{lr} \mathcal{L}_s(\Omega_h, cl).$$

Но в отличие от известных решений, использующих многослойные карты [18, 19], значение c_{ij} в клетке $(i, j) \in \Omega_h$ результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ рассчитывается по данным клеток (i, j) слоев $\mathcal{L}_s(\Omega_h, cl)$ в соответствии с формулой Байеса:

$$c_{ij} = \arg \max_{b=1,2,\dots,cl} \left(\frac{P(c_{ij}^{(b)}) P(D | c_{ij}^{(b)})}{\sum_{k=1}^{cl} P(c_{ij}^{(k)}) P(D | c_{ij}^{(k)})} \right), \quad (3)$$

где верхний индекс в записи $c_{ij}^{(b)}$ обозначает, что c_{ij} соответствует классу b ; $D = \{(c_{ij}, s) = \mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl; i, j) | s = \overline{1, lr}\}$; $P(c_{ij}^{(b)})$ — априорная вероятность появления класса b в клетке (i, j) ; $P(D | c_{ij}^{(b)})$ — условная вероятность появления совокупности значений D в слоях $s = \overline{1, lr}$, если в действительности в клетку (i, j) попадает объект класса b .

Обновление результирующего слоя карты выполняется с периодом Δt на интервале времени $[0, T]$.

Таким образом, на первом этапе определения вероятности столкновения с препятствием P оценивается, в каком состоянии находится каждая (i, j) ячейка результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ по формуле (3) на основе совокуп-

ности значений D всех классификаторов. На этом же этапе осуществляется планирование опорной траектории движения $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ по данным результирующего слоя.

На втором этапе необходимо определить вероятность нахождения препятствия в ячейке (i, j) .

В общем случае существует подмножество $CL_{ac} \subseteq CL$ ($CL = \{1, 2, \dots, cl\}$) классов объектов, столкновения с которыми приводят к аварийной ситуации, и подмножество $CL_B \subseteq CL$ классов объектов, не приводящих к аварийной ситуации. При этом $CL_{ac} \cap CL_B = \emptyset$. В дальнейшем будем считать, что классы из подмножества CL_{ac} не различимы между собой. Для определенности будем обозначать любой из классов подмножества CL_{ac} как q , а из подмножества CL_B — как \bar{q} .

Из-за погрешности измерений в ИИС найденная оценка класса q в клетке $(i, j) \in \Omega_h$ результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ соответствует классу $q \in CL_{ac}$ в действительности с вероятностью p_{ij} . Тогда по данным результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ можно определить однослойную карту $\mathcal{P}(\Omega_h, cl) = \{p_{ij} \mid p_{ij} = p(t, \omega_{ij}), \omega_{ij} \in \Omega_h\}$, содержащую информацию о вероятности правильной классификации q , где функция $p(\cdot)$ принимает на $\{\omega_{ij} \mid i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ значения в диапазоне $[0, 1]$.

Поскольку карта $\mathcal{P}(\Omega_h, cl)$ также динамически обновляемая, то препятствия в каждой клетке классифицируются в каждый момент времени

$$\tau \in [T_0^{c_{ij}}, T_0^{c_{ij}} + \Delta t, T_0^{c_{ij}} + 2\Delta t, \dots, \dots, T_0^{c_{ij}} + k\Delta t, \dots, T^{c_{ij}}],$$

где $[T_0^{c_{ij}}, T^{c_{ij}}]$ — интервал время нахождения клетки (i, j) в зоне видимости ИИС робота, причем результаты всех классификаций независимы между собой.

Тогда на k -м шаге классификации вероятность p_{ij} можно определить следующим образом [20]:

$$p_{ij}^{(k)} = p_{ij}(q \mid \hat{q}_k) = \frac{p(\hat{q} \mid q)p_{ij}(q \mid \hat{q}_{k-1})}{p(\hat{q} \mid q)p_{ij}(q \mid \hat{q}_{k-1}) + p(\hat{q} \mid \bar{q})p_{ij}(\bar{q} \mid \hat{q}_{k-1})}. \quad (4)$$

Таким образом, формирование $\mathcal{P}(\Omega_h, cl)$ позволяет определить вероятность обнаружения приводящих к столкновению объектов класса $q \in CL_{ac}$ на результирующем слое $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$.

Вероятность столкновения робота с препятствием

Пусть в каждый момент времени $t \in [0, T]$ МР занимает компактное множество $A_f(\mathbf{q}) \subset \Omega_h$, $\mathbf{q} \in \mathcal{C}$. Определено вероятностное пространство $(E, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, где E — конечное множество элементарных исходов; \mathcal{F} — сигма-алгебра подмножеств E — событий; \mathbb{P} — вероятностная мера. Тогда, учитывая динамику системы управления движением МР, при его следовании по спланированной траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, можно определить случайную реализацию (элементарный исход) $e \in E$ процесса движения — занимаемое им случайное подмножество $A_e = \bigcup_{t \in [\tau, \tau + \delta]} A_f(\mathbf{r}_e(t)) \subset \Omega_h$

за интервал времени δ . Другими словами, при движении за время δ с учетом всех возможных боковых и угловых отклонений от спланированной траектории (рис. 3) — ансамбля случайных реализаций процесса движения — МР будет принадлежать случайному подмножеству $A_r = \bigcup_{e \in E_r} A_e$ множества Ω_h , $E_r \subseteq E$ — подмножество возможных траекторий движения робота.

При этом вероятность накрытия МР клетки ω_{ij} за время δ равна

$$P_{\omega_{ij}}^{\text{cov}}(\omega_{ij} \in A_r) = \mathbb{P}(\{e : \omega_{ij} \in A_r(e)\}). \quad (5)$$

Вычисление вероятности $P_{\omega_{ij}}^{\text{cov}}$ непосредственно по формуле (5) затруднительно, поэтому ее удобнее рассматривать как условную вероятность $p(\omega_{ij} \mid \theta)$ накрытия клетки, отстоящей на расстоянии θ от спланированной траектории (от ближайшей точки траектории) (рис.3). В этом случае вероятность $P_{\omega_{ij}}^{\text{cov}} = p(\omega_{ij} \mid \theta)$ можно интерпретировать аналогично координатному закону поражения цели, который характеризует вероятность поражения элементарной цели при условии, что точка попадания средства поражения относительно цели имеет заданные координаты [21]. Примеры координат

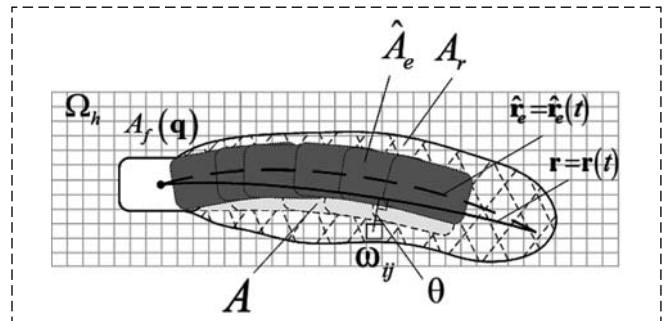


Рис. 3. Отклонение фактической траектории $\mathbf{r}_e = \mathbf{r}_e(t)$ мобильного робота от спланированной $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$

Fig.3. Deviation of the real trajectory $\mathbf{r}_e = \mathbf{r}_e(t)$ of the mobile robot from the planned trajectory $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$

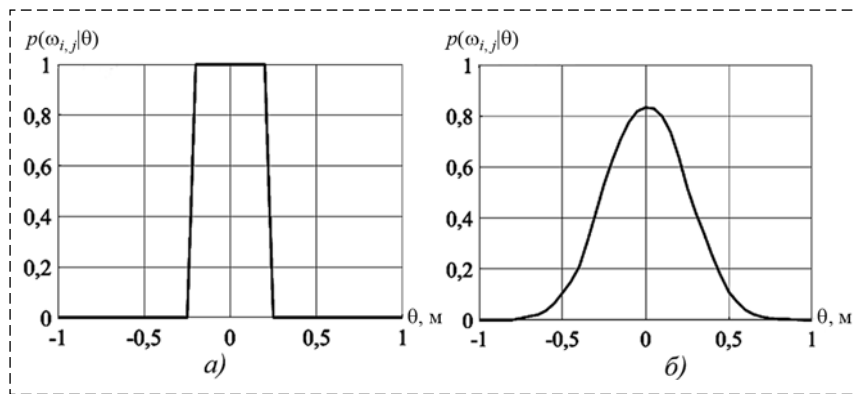


Рис. 4. Координатный закон накрытия МР ячеек, расположенных на удалении θ от траектории:

a — ошибка по углу и боковому отклонению в системе управления отсутствует; b — ошибки системы управления по углу и боковому отклонению распределены по нормальному закону

Fig.4. Coordinate law of coverage of cells located at a distance θ from the trajectory by a mobile robot:

a — there are no control system's errors in the angle and lateral deviation; b — there are control system's error in angle and lateral deviation with normal distribution

натного закона $p(\omega_{ij} | \theta)$ для МР, полученные с помощью имитационного моделирования методом Монте-Карло с учетом характеристик системы управления движением и его габаритных размеров, приведены на рис. 4.

Зная условную вероятность $p(\omega_{ij} | \theta)$, можно определить область A_r , в которой вероятность столкновения МР с препятствием будет отлична от нуля. Будем считать аварийной ситуацией в момент времени t столкновение с препятствием k , занимающим подмножество $O_k \subset \Omega_h$ [13]:

$$O_k \cap A_r \neq \emptyset, \forall t \in [0, T]. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом выражения (5) и условия (6) вероятность столкновения МР с препятствием в момент времени t при горизонте прогноза движения δ будет равна

$$P(\tau \leq t \leq \tau + \delta) = \max_{A_r} (p(\omega_{ij} | \theta) p(t, \omega_{ij})). \quad (7)$$

Значение вероятности по формуле (7) необходимо вычислять в каждый момент времени движения робота $t \in [0, T]$ в целях учета новой информации об окружающей среде, в том числе появления динамических препятствий в зоне действия робота.

Экспериментальная проверка модели оценки вероятности столкновения мобильного робота с препятствием

Представленный выше метод определения вероятности столкновения МР с препятствием

(4)–(7) был реализован в виде программного модуля в среде ROS (Robot Operating System) и применен в системе управления движением мобильного робота "Пластун". Для проверки адекватности модели вычисления вероятности столкновения робота с препятствием была проведена серия натурных экспериментов с данным мобильным роботом (рис. 5, см. третью сторону обложки), оснащенным одним сканирующим 2D-дальномером. В рамках экспериментов была смоделирована ситуация появления на траектории движения МР препятствия с возможностью его объезда (рис. 5, б, см.

третью сторону обложки).

Задавалась целевая точка, в которую МР необходимо было выполнить перемещение. После планирования опорной траектории робот начинал движение. После возникновения на пути робота препятствия (рис. 6, а) "Модуль безопасности" сообщал о возможном столкновении в блок "Управление автодвижением", который отменял движение по текущей траектории и запускал построение новой траектории в блоке "Планирование траектории" (рис. 6, б), после построения которой МР совершал объезд препятствия (рис. 6, в, г).

На графике изменения вероятности столкновения (рис. 6, д) между точками 1 и 2 вероятность столкновения резко возрастала после появления препятствия на пути следования МР. Далее вероятность уменьшалась до нуля (точка 3), так как происходила отмена текущей "опасной" траектории и выполнялось планирование новой. После точки 4 вероятность находилась в пределах от 0,6 до 0,7 из-за уменьшения пространства для совершения объезда препятствия и планирования траектории в ограниченном пространстве между препятствием и стенкой коридора.

Во время выполнения данного эксперимента после завершения объезда препятствия по коридору навстречу роботу незапланированно двигался человек (динамическое препятствие), который обогнул робота. В момент сближения робота и человека вероятность столкновения увеличилась, что и иллюстрирует пик между точками 5 и 6 (рис. 6, д).

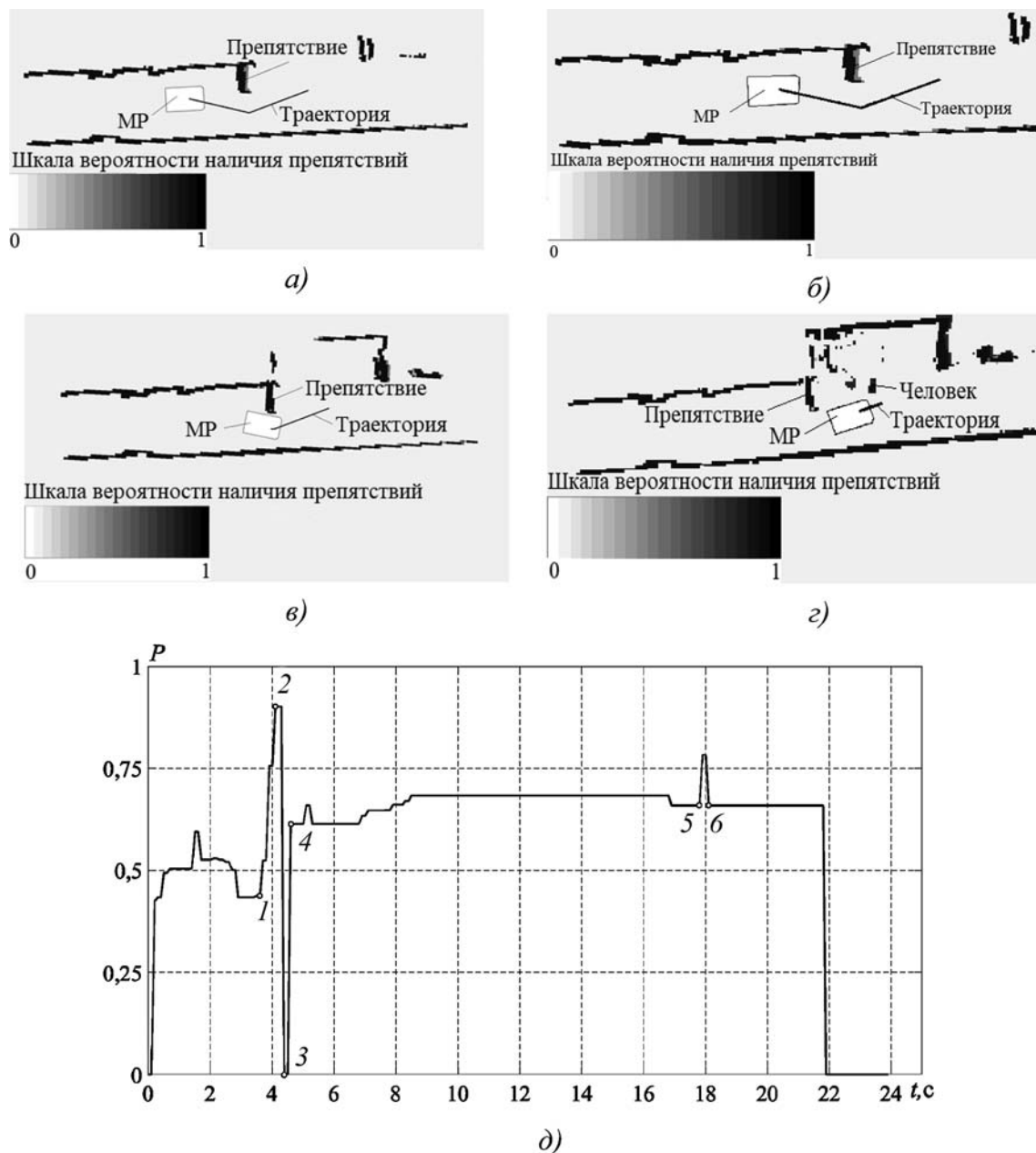


Рис. 6. Обезд препятствия мобильным роботом:

a — обнаружение препятствия на траектории; *б* — построение траектории для объезда; *в* — объезд препятствия; *г* — остановка МР; *д* — график изменения вероятности его столкновения с препятствием

Fig. 6. Obstacle avoiding of the mobile robot:

a — detecting an obstacle on the trajectory; *б* — planning the trajectory for avoiding obstacle; *в* — avoiding an obstacle; *г* — stopping the mobile robot; *д* — the plot of probability collision with an obstacle

Заклучение

Представленный в работе метод оценки вероятности столкновения с препятствием движущегося по спланированной траектории автономного МР в отличие от известных базируется не только на результатах анализа расположения и поведения объектов во внешней среде, но и на использовании статистических характеристик системы управления движением. Такой подход

при дискретном представлении (в виде клеток) области возможных перемещений МР относительно спланированной траектории позволяет для каждой клетки этой области рассматривать оценку вероятности столкновения как произведение вероятности нахождения препятствия в этой клетке и условной вероятности накрытия МР этой клетки. Это не требует привлечения дополнительной априорной информации о возможных перемещениях препятствий, что

в методическом и вычислительном плане существенно упрощает задачу.

Особенностью представленного метода является также применение многослойной карты проходимости, которая позволяет снизить число ошибочных классификаций о препятствиях за счет комплексирования результатов работы отдельных классификаторов [22] в результирующий слой с помощью байесовского вывода.

В целом вычисление вероятности столкновения автономного мобильного робота с препятствием позволяет перейти к количественной оценке безопасности его движения с учетом анализа возможного наносимого ущерба и, как следствие, к риск-ориентированному управлению движением робота, которое рассматривается как дальнейшее направление работы авторов.

Список литературы

1. Liu S. B. et al. Provably Safe Motion of mobile robots in human environments // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2017). 2017. P. 1351-1357. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202313.
2. Adam S., Larsen M., Jensen K., Schultz U. P. Rule-based dynamic safety monitoring for mobile robots // Journal of software Engineering. 2016. Vol. 7. P. 120—141.
3. Hafez O. A., Arana G. D., Spenko M. Integrity risk-based model predictive control for mobile robots // 2019 International conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Canada, 2019. P. 5793—5799. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793521.
4. Gill J.S., Pisu P., Krovi V. N., Schmid M. J. Behavior identification and prediction for a probabilistic risk framework // arXiv:1905.08332v1, 2019, 10 p. DOI: 10.1115/DSCC2019-9097.
5. Blake A. et al. FPR — Fast path risk algorithm to evaluate collision probability // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5, N. 1. P. 1—7. DOI: 10.1109/LRA.2019.2943074.
6. Gindele T., Brechtel S., Dillmann R. A probabilistic model for estimating driver behaviors and vehicle trajectories in traffic environments // 13th International IEEE Conference on, IEEE. 2010. P. 1625—1631. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625262.
7. Xiangkun He, Yulong Liu, Chen Lv, Xuewu Ji, Yahui Liu. Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilization // Vehicle System Dynamics. 2019. Vol. 57, Iss. 8. P. 1163—1187. DOI: 10.1080/00423114.2018.1537494.
8. Puphal T., Probst M., Eggert J. Probabilistic Uncertainty-Aware Risk Spot Detector for Naturalistic Driving // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2019. Vol. 4, N. 3. P. 406—415. DOI: 10.1109/TIV.2019.2919465.
9. Miura J., Negishi Y., Shirai Y. Adaptive robot speed control by considering map and motion uncertainty // Robotics and Autonomous Systems. 2006. Vol. 54. P. 110—117. DOI: 10.1016/j.robot.2005.09.020.
10. Agamennoni G., Nieto J. I., Nebot E. M. Estimation of multivehicle dynamics by considering contextual information // IEEE Transactions on robotics. August 2012. Vol. 28, N. 4. DOI: 10.1109/TRO.2012.2195829.
11. Яковлев Д.С., Тачков А. А. Задача оценки и обеспечения безопасности наземных робототехнических комплексов // Сб. Тр. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. "Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем". 2019. С. 409—413.
12. Северцев Н. А., Дедков В. К. Системный анализ и моделирование безопасности. М.: Высшая школа, 2006. 462 с.
13. Rios-Martinez J., Spalanzani A., Laugier C. Understanding human interaction for probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach // IEEE Int. Conf. IROS. 2011. P. 2014—2019. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094496.
14. Fulgenzi C., Spalanzani A., Laugier C. Dynamic obstacle avoidance in uncertain environment combining PVOs and occupancy grid // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma. 2007. P. 1610—1616. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363554.
15. Кузнецов А. В. Модели движения, взаимодействия и сети связи мобильных агентов в иерархических системах на основе клеточных автоматов. Дисс. доктора физ.-мат. наук, 05.13.01, место защиты г. Воронеж, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет", 2019. 268 с.
16. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation // Computer. June 1989. Vol. 22. P. 46—57. DOI: 10.1109/2.30720.
17. Freda L. et al. 3D Multi-robot patrolling with two-level coordination strategy // Autonomous Robots. 2019. Vol. 43. P. 1747—1779. DOI: 10.1007/s10514-018-09822-3.
18. Lu D. V., Hershberger D., Smart W. D. Layered costmaps for context-sensitive navigation // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2014. P. 709—715. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942636.
19. Fankhauser P., Hutter M. A Universal Grid Map Library: Implementation and Use Case for Rough Terrain Navigation // Robot Operating System (ROS), Springer, Cham. 2016. Vol. 1. P. 99—120. DOI: 10.1007/978-3-319-26054-9_5.
20. Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox. Probabilistic Robotics. MIT press, 2006. P. 26—33.
21. Буравлев А. И. К вопросу определения приведенной зоны поражения объектов // Вооружение и экономика. 2018. № 2(44). С. 11—16.
22. Тачков А. А., Вуколов А. Ю., Козов А. В. Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу "Эльбрус" // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 4. С. 655—664. DOI: 10.15827/0236-235X.128.655-664.

Probability of Collision between Autonomous Mobile Robot with an Obstacle

D. S. Iakovlev, yakovlevds@bmstu.ru, A. A. Tachkov, tachkov@bmstu.ru,
Science and Educational Center "Robotics" Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Iakovlev D. S., Engineer of the Department "Automated transport systems", Science and Educational Center "Robotics" Bauman Moscow State Technical University, Post-graduate of "Theory of Mechanisms and Machines" department of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: yakovlevds@bmstu.ru

Accepted on December 03, 2020

Abstract

The probability estimation problem of a collision between path tracking for an autonomous mobile robot with an obstacle is considered. We reviewed and analyzed methods for solving this problem. We show that reviewed methods use periodically updated grid maps (occupancy grids). The new method of probability estimation of the collision between the mobile robot with an obstacle is presented. This method based on the use of probabilistic grid map. Each cell of this map stores the estimated probability that the obstacle is located within. In addition, this map stores the conditional probability of occupying of the map cells by a robot, taking into account the possible lateral and angular deviation from the planned trajectory. This deviation caused by error connected with dynamic characteristics of the tracking system. To build the probabilistic occupancy grid, the dynamically updated multilayer grid map was used. Each layer of this map, except for the resulting output, has been filled with the data obtained from classifiers which process information incoming from sensory of the robot. This layer is the result of Bayesian inference from the layers laying below. The motion control system provides construction of the multilayered grid maps, probabilistic occupancy grids, coordinate estimations, path planning, motion tracking and the probability estimation for collision with obstacles. The method such estimation is implemented as an embedded module compatible with ROS (Robot Operating System). The description of experiments with the mobile robot in-nature (on the field) is given in the case when a motile obstacle appears intercepting the planned path. The estimated changes of probability for a collision between the mobile robot with obstacle are presented, interpretation of the obtained results is also given. Here we demonstrated the necessity of collision probability estimation for assessment of the risk as the main safety indicator of the given motion control system. Results of this work are considered and evaluated as a solution to the problem of ensuring the safety of motion tracking for autonomous mobile robots.

Keywords: autonomy, traffic safety, probability of collision with an obstacle, security, mobile robot, traffic control system, risk, emergency

For citation:

Iakovlev D. S., Tachkov A. A. Probability of Collision between Autonomous Mobile Robot with an Obstacle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 125—133.

DOI: 10.17587/mau.22.125-133

References

1. Liu S. B. et al. Provably Safe Motion of mobile robots in human environments, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2017)*, 2017, pp. 1351—1357, DOI: 10.1109/IROS.2017.8202313.
2. Adam S., Larsen M., Jensen K., Schultz U. P. Rule-based dynamic safety monitoring for mobile robots, *Journal of software Engineering*, 2016, vol. 7, pp. 120—141.
3. Hafez O. A., Arana G. D., Spenko M. Integrity risk-based model predictive control for mobile robots, *2019 International conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, Canada, 2019, pp. 5793—5799, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793521.
4. Gill J.S., Pisu P., Krovı V. N., Schmid M. J. Behavior identification and prediction for a probabilistic risk framework, arXiv:1905.08332v1, 2019, 10 p. DOI: 10.1115/DSCC2019-9097.
5. Blake A. et al. FPR — Fast path risk algorithm to evaluate collision probability, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 1—7, DOI: 10.1109/LRA.2019.2943074.
6. Gindele T., Brechtel S., Dillmann R. A probabilistic model for estimating driver behaviors and vehicle trajectories in traffic environments, *13th International IEEE Conference on, IEEE*, 2010, pp. 1625—1631, DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625262
7. Xiangkun He, Yulong Liu, Chen Lv, Xuewu Ji, Yahui Liu. Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilization, *Vehicle System Dynamics*, 2019, vol. 57, iss. 8, pp. 1163—1187, DOI: 10.1080/00423114.2018.1537494.
8. Puphal T., Probst M., Eggert J. Probabilistic Uncertainty-Aware Risk Spot Detector for Naturalistic Driving, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 406—415, DOI: 10.1109/TIV.2019.2919465.
9. Miura J., Negishi Y., Shirai Y. Adaptive robot speed control by considering map and motion uncertainty, *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, vol. 54, pp. 110—117, DOI: 10.1016/j.robot.2005.09.020.
10. Agamenonni G., Nieto J. I., Nebot E. M. Estimation of multivehicle dynamics by considering contextual information, *IEEE Transactions on robotics*, August 2012, vol. 28, no. 4, DOI: 10.1109/TRO.2012.2195829.
11. Iakovlev D. S., Tachkov A. A. The task of assessing and ensuring the safety of ground-based robotic systems, *Sbornik trudov 3-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadyozhnosti, ustojchivosti i effektivnosti sistem"*, pp. 409—413 (in Russian).
12. Severtsev N. A., Dedkov V. K. System analysis and safety modeling, Moscow, Vysshaya shkola, 2006, 462 pp. (in Russian).
13. Rios-Martinez J., Spalanzani A. and Laugier C. Understanding human interaction for probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach, *IEEE Int. Conf. IROS*, 2011, pp. 2014—2019, DOI: 10.1109/IROS.2011.6094496.
14. Fulgenzi C., Spalanzani A., Laugier C. Dynamic obstacle avoidance in uncertain environment combining PVOs and occupancy grid, *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, 2007, pp. 1610—1616, DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363554.
15. Kuznetsov A. V. Models of movement, interaction and communication networks of mobile agents in hierarchical systems based on cellular automata, Doctor thesis in Physical and Mathematical Sciences, Voronezh State University, 2019, 268 p. (in Russian).
16. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, *Computer*, June 1989, vol. 22, pp. 46—57.
17. Freda L. et al. 3D Multi-robot patrolling with two-level coordination strategy, *Autonomous Robots*, 2019, vol. 43, pp. 1747—1779, DOI: 10.1007/s10514-018-09822-3.
18. Lu D. V., Hershberger D., Smart W. D. Layered costmaps for context-sensitive navigation, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2014, pp. 709—715, DOI: 10.1109/IROS.2014.6942636.
19. Fankhauser P., Hutter M. A Universal Grid Map Library: Implementation and Use Case for Rough Terrain Navigation, *Robot Operating System (ROS)*, Springer, Cham, 2016, vol. 1, pp. 99—120, DOI: 10.1007/978-3-319-26054-9_5.
20. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics, MIT press, 2006, pp. 26—33.
21. Buravlev A. I. To the question of determining the reduced damage zone of objects, *Vooruzhenie i ekonomika*, 2018, vol. 2 (44), pp. 11—16.
22. Tachkov A. A., Vukolov A. Yu., Kozov A. V. Peculiarities of porting the Robot Operating System Framework onto Elbrus platform, *Programmnye produkty i sistemy*, 2019, vol. 32, no. 4, pp. 655—664. DOI: 10.15827 / 0236-235X.128.655-664 (in Russian).