

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., **А. В. Назарова**, канд. техн. наук, avn@bmstu.ru,
Мэйсинь Чжай, аспирант, 982696853@163.com,
Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Планирование движения мобильных роботов при выполнении задач вероятностного поиска

Статья посвящена решению задач поиска цели мобильными роботами или летательными аппаратами при тушении пожаров, в поисковых операциях на земле и воде в случае аварий или стихийных бедствий. С учетом характеристик поисковой зоны и используемых датчиков созданы две вероятностные модели. Первая — плотность распределения вероятности нахождения цели, вторая — условная вероятность обнаружения цели датчиком в зависимости от расстояния между датчиком и исследуемой точкой, в которой находится цель. На основе этих моделей проанализированы параметры и процедура поиска и получено соотношение между вероятностью обнаружения цели, временем поиска и другими параметрами. Основное отличие предложенного подхода от известных заключается в том, что оптимизация полученных соотношений приводит к оптимальному распределению времени в процессе поиска и, в результате, к повышению вероятности обнаружения цели. В процессе исследований, в первую очередь, рассмотрен случай, когда распределение вероятности нахождения цели в поисковой зоне имеет дискретный вид (сетевая карта), и получена формула вероятности обнаружения цели при дискретном и непрерывном исследовании датчиком. С использованием метода множителей Лагранжа и динамического планирования данная формула максимизирована, что позволило получить оптимальное распределение поискового времени в каждой ячейке. Далее на основе полученного результата исследование расширено до непрерывного распределения вероятности нахождения цели в поисковой зоне, в результате получен функционал вероятности обнаружения цели от времени поиска, плотности распределения вероятности нахождения цели и траектории поиска (скорости). Этот функционал при заданном времени поиска и плотности распределения вероятности нахождения цели позволяет получить оптимальное управление (траекторию и скорость). Приведены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного метода поиска. Показано, что чем больше вероятность нахождения цели в исследуемой точке и чем меньше скорость движения агента, тем больше вероятность обнаружения цели. При некоторых значениях параметров поиска разница в вероятностях обнаружения цели достигает 75,3 %.

Ключевые слова: поиск цели, теория вероятности, планирование траектории, оптимальное распределение, условная вероятность

Введение

Задачи покрытия и поиска в сфере робототехники разрабатываются в целях применения в самых разных областях, например, для тушения пожаров и при поисковых операциях, выполняемых не только в воздухе и на земле, но и в воде. Сутью задачи покрытия и поиска является то, что агенты должны сканировать всю поисковую зону, избегая при этом повторных поисков и затрачивая минимальное время на обнаружение целей с большой вероятностью. Кроме того, важно учитывать характеристики датчиков и поисковой зоны в каждой конкретной задаче. Таким образом, очевидна необходимость оптимального планирования траектории и скорости движения агентов.

Алгоритмы покрытия и поиска были предметом обсуждения многих ученых [1], особенно остро их интересовал вопрос планирования траекторий. Но недостатком существующих работ является то, что в них лишь объясняется, по каким траекториям должны двигаться роботы, чтобы покрыть всю поисковую зону, а вопросы оптимальных скоростей и вероятности нахождения целей с учетом характеристик датчиков и поисковой зоны освещались мало. В статьях [2, 3] предложен очень распространенный в настоящее время метод поиска, в основе которого лежат теории Байеса и Гаусса. Преимущество этого метода состоит в том, что на каждой итерации обновляются вероятностная карта и вероятность распределения целей. В то же время движения агентов планируются

таким образом, чтобы они стремились двигаться в направлении, в котором вероятность нахождения целей выше и которое обеспечивает более высокую скорость решения задачи поиска несколькими кооперативными агентами. Однако этот метод не помогает избежать повторных поисков и отсканировать поисковую зону целиком. Кроме того, его недостатком является необходимость больших вычислений в процессе итераций.

В данной работе рассматривается подход к поиску целей в зоне одним агентом на основе теории вероятности, плотности распределения вероятностей нахождения цели и условной вероятности ее обнаружения. Цель работы состоит в получении соотношений, связывающих вероятность обнаружения цели и траекторию движения агента.

Постановка задачи

На основе сказанного выше мы поставим следующую задачу: агент, в данной статье — беспилотный летательный аппарат (БПЛА), выполняет задачу обнаружения цели в плоскости известных размеров. Задачей агента является сканирование всей поисковой зоны за заданное время и нахождение вероятности обнаружения цели.

Создание вероятностных моделей поиска

Пусть имеется карта местности $L_x \times L_y$, на которой находится цель. Для каждой точки (x, y) на карте имеется априорная информация о плотности распределения вероятности нахождения цели в ней $\rho(x, y)$, причем суммарная вероятность нахождения цели на карте равна

$$\iint \rho(x, y) dx dy \leq 1. \quad (1)$$

Дискретизируем непрерывную карту сеткой размером $M \times N$, где M — число строк разбиения, а N — число столбцов. Для каждой ячейки сетки (m, n) легко находится вероятность нахождения цели $c(m, n)$. Суммарная вероятность нахождения цели на сетевой карте равна

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c(m, n) \leq 1. \quad (2)$$

Пусть параметры поиска (высота полета и т. д.) остаются постоянными, и агент ищет цель с помощью радиолокатора, гидролокатора и т. д. При этом существуют две возможности: (1) датчик при любом элементарном наблюдении может обнаружить цель, эти элементарные наблюдения следуют через две-три минуты одно за другим; (2) датчик может вести непрерывные наблюдения: примером является визуальное наблюдение.

В случае дискретных наблюдений имеет значение: условная вероятность обнаружения цели при условии, что цель находится в области видимости датчика, при одном просмотре записывается как s , зависящая от характеристики и среднего расстояния между датчиками и целью. При рассмотрении случая непрерывного поиска: каждый просмотр занимает малое время Δt , при этом условная вероятность обнаружения цели в ячейке равна $s = \alpha \Delta t$, α зависит от характеристики и среднего расстояния между датчиками и целью.

Точнее, вероятность обнаружения целей — это непрерывная убывающая функция расстояния между датчиками и целями [4, 5]: $s(z_k | d_k) = \lambda(d_k)$, показана на рис. 1, где наблюдение z_k — бинарный параметр: $z_k \in \{1, 0\}$, 1 означает обнаружение цели, а 0 — необнаружение; d_k — расстояние между датчиками и целями; P_D — вероятность обнаружения датчика (учитывает неопределенности наблюдения $P_D \in [0, 1]$); P_F — вероятность ложной тревоги датчика, $P_F \in [0, 1]$; d_{in} — наибольшее расстоя-

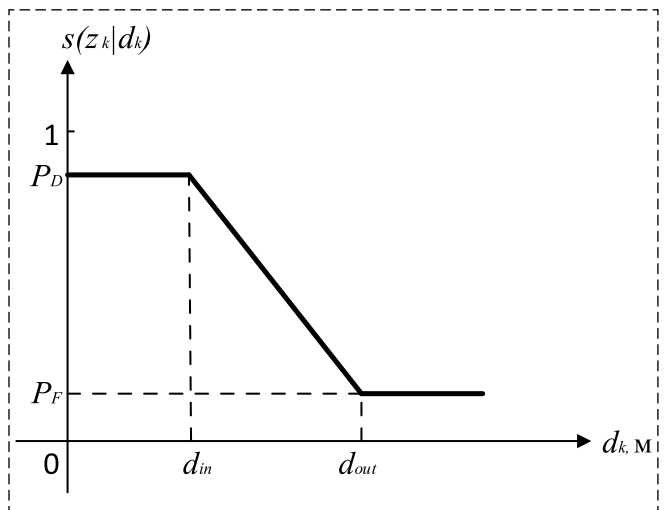


Рис. 1. Условная вероятность обнаружения цели
Fig. 1. Conditional probability of target detection (approximate relationship between probability of detection and distance)

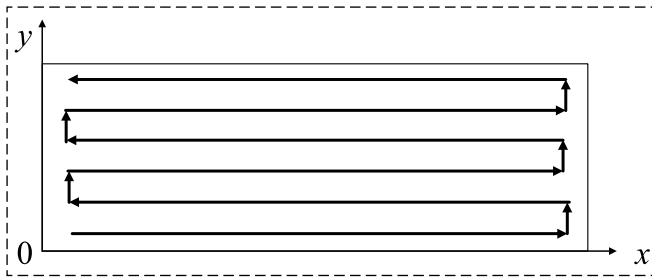


Рис. 2. Метод поиска в плоскости
Fig. 2. The search method of robot in the plane

ние, с которого датчик наблюдает цель с вероятностью P_D ; d_{out} — наименьшее расстояние, начиная с которого датчик не может обнаружить цель, но сообщает, что она существует с вероятностью P_F (ложная тревога датчика). Тогда [6],

$$s(z_k | d_k) = \begin{cases} P_D & \text{при } d_k < d_{in}; \\ P_D - \frac{(P_D - P_F)(d_k - d_{in})}{d_{out} - d_{in}} & \text{при } d_{in} \leq d_k \leq d_{out}; \\ P_F & \text{при } d_k > d_{out}. \end{cases} \quad (3)$$

Пусть T — время, отпущенное на поиск; P_T — вероятность обнаружения цели за время T , r_t является траекторией поиска. На основе знания P_T требуется проанализировать параметры и процедуру поиска, точнее, найти

$$P_T = P_T(r_t, \rho(x, y), T). \quad (4)$$

В случае поисково-спасательной ситуации необходимо обследовать всю зону поиска (плоскость) или ее часть. В связи с этим агент может летать, например, по параллельным линиям, как показано на рис. 2.

Исследование процесса поиска с использованием теории вероятности

Основываясь на анализе приведенных выше моделей и целевой функции (4), делаем вывод, что важной задачей является нахождение вероятности поиска. В этой задаче имеются два известных вероятностных параметра: плотность распределения вероятности нахождения цели $\rho(x, y)$ в точке (x, y) и вероятность обнаружения датчиком цели за один просмотр при условии, что цель находится в данной точке. Обозначим этот параметр $s = \alpha \Delta t$. В этом разделе сначала рассмотрим случай, когда агент исследует одну

ячейку, затем несколько ячеек, а далее рассмотрим случай, когда агент исследует плоскость непрерывно.

1. *Агент исследует одну ячейку.*

А. Пусть разыскиваемый объект (цель) находится в некоторой ячейке, при этом c — вероятность нахождения цели в ячейке, s — условная вероятность обнаружения цели за один просмотр при условии, что цель находится в ячейке.

Тогда вероятность обнаружения цели за один просмотр равна $P_1 = cs$.

Пусть теперь датчик осуществляет n просмотров одной ячейки. Тогда вероятность обнаружить цель за один из n просмотров составляет

$P_n = \{ \text{вероятность обнаружения за 1-й просмотр} \} \text{ ИЛИ } \{ (\text{вероятность необнаружения за 1-й просмотр}) \text{ И } (\text{обнаружение за 2-й просмотр}) \} \text{ ИЛИ... } \{ \text{вероятность необнаружения с 1-го до } (n-1)\text{-го просмотра} \} \text{ И } (\text{обнаружение за } n\text{-й просмотр}) \}$

т. е.

$$P_n = cs + (1-s)cs + (1-s)^2cs + \dots + (1-s)^{n-1}cs = c(1 - (1-s)^n). \quad (5)$$

Сделаем здесь три замечания:

- 1) очевидно, что $P_n \rightarrow c$ при $n \rightarrow +\infty$;
- 2) вероятностные характеристики датчиков и цели разделены;
- 3) нетрудно получить рекуррентные соотношения для P_n . Действительно, из (5) следует:

$$\frac{P_{i+1}}{c} = \frac{P_i}{c} + \left(1 - \frac{P_i}{c}\right)s,$$

откуда

$$P_{i+1} = (1-s)P_i + cs, P_0 = 0, i = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

Б. Рассмотрим теперь непрерывный случай. Сделаем следующие допущения:

- 1) каждый просмотр ячейки занимает малое время h ;
- 2) условная вероятность обнаружения цели за время h есть $s = \alpha h$ (α — характеристика датчика, которая зависит от расстояния между датчиками и целью).

Тогда из соотношения (6) следует: $P_{t+h} = (1 - \alpha h)P_t + c\alpha h$, откуда при $h \rightarrow 0$ имеем: $\dot{P}_t = -\alpha h P_t + c\alpha$, или $\dot{P}_t = \alpha(c - P_t)$, $P_0 = 0$. Решение этого дифференциального уравнения имеет вид

$$P_t = c(1 - e^{-\alpha t}), \quad (7)$$

где P_t — вероятность обнаружить цель в ячейке за время t , т. е. это функция распределения вероятности обнаружения цели в зависимости от времени. График P_t представлен на рис. 3.

В. Пусть теперь в процессе наблюдения вероятность нахождения цели в ячейке меняется во время просмотра.

Тогда выражение (5) имеет вид

$$P_n = c_1 s + (1-s)c_2 s + (1-s)^2 c_3 s + \dots + (1-s)^{n-1} c_n s, \quad (8)$$

где c_i — вероятность того, что цель находится в ячейке во время i -го измерения.

Очевидно, что соответствующее выражению (8) рекуррентное соотношение имеет вид

$$P_{n+1} = P_n + (1-s)^n s c_{n+1}, P_0 = 0. \quad (9)$$

Обозначим $Q_n = (1-s)^n$, тогда рекуррентные соотношения для (9) имеют вид

$$\begin{cases} P_{n+1} = P_n + Q_n s c_{n+1}, P_0 = 0; \\ Q_{t+h} = Q_t (1-s), Q_0 = 1. \end{cases} \quad (10)$$

Г. Теперь рассмотрим непрерывный процесс. Пусть, по-прежнему, просмотры ячейки

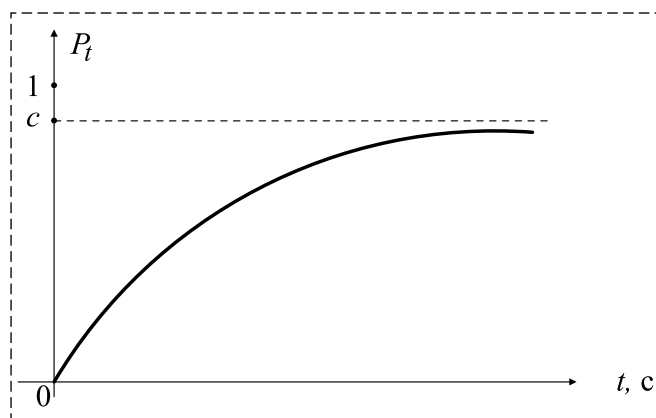


Рис. 3. Функция распределения вероятности обнаружения цели от времени

Fig. 3. The distribution function of target detection probability over time

требуют времени t , каждый просмотр занимает малое время h , при этом условная вероятность обнаружения цели в ячейке равна $s = \alpha h$, а вероятность нахождения цели в ячейке зависит от времени: $c = c_t$. Тогда уравнения (10) примут вид

$$\begin{cases} P_{t+h} = P_t + Q_t c_{t+h} \alpha_{t+h} h; \\ Q_{t+h} = Q_t (1 - \alpha_t h), \end{cases}$$

и соответствующие дифференциальные уравнения можно записать в виде

$$\begin{cases} \dot{P}_t = Q_t c_t \alpha_t, P_0 = 0; \\ \dot{Q}_t = -\alpha_t Q_t, Q_0 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Допустим, что $\alpha_t = \alpha = \text{const}$, тогда из второго уравнения (11) следует $Q_t = e^{-\alpha t}$, для P_t :

$$\dot{P}_t = e^{-\alpha t} c_t \alpha, P_0 = 0. \quad (12)$$

Решением (12) является

$$P_t = \alpha \int_0^t c_t e^{-\alpha t} dt. \quad (13)$$

2. Агент исследует несколько ячеек

А. Рассмотрим случай, когда датчик осматривает k ячеек, в одной из которых может находиться цель (рис. 4).

Пусть c_i — вероятность нахождения цели в i -й ячейке, c_i не зависит от числа сделанных датчиком просмотров, т. е. цель неподвижна, $\sum c_i \leq 1$; s — по-прежнему условная вероятность обнаружения цели при условии, что цель находится в исследуемой ячейке (характеристика датчика); n_i — число просмотров датчиком i -й ячейки.

Нетрудно увидеть, что вероятность обнаружения цели после $n = \sum_{i=1}^K n_i$ просмотров K ячеек имеет вид

$$P_K^n = \sum_{i=1}^K c_i (1 - (1-s)^{n_i}), \quad (14)$$

при этом, естественно, $\sum_{i=1}^K c_i \leq 1$.

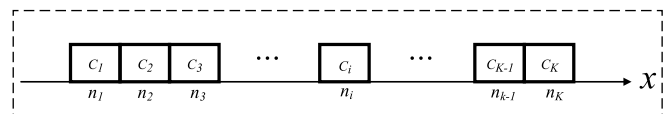


Рис. 4. Модель обнаружения цели

Fig. 4. Target detection model

Б. Пусть теперь датчик осматривает те же ячейки, каждую в течение времени t_i , как показано на рис. 4. Тогда вероятность обнаружить цель, по крайней мере, в одной из ячеек за время $T = \sum_{i=1}^K t_i$ имеет вид

$$P_K^T = \sum_{i=1}^K c_i (1 - e^{-\alpha t_i}). \quad (15)$$

Ясно, что вероятность P_K^T не зависит от порядка просмотра ячеек, но зависит от распределения времени осмотра ячеек.

Будем теперь искать $\{t_i\}$, максимизирующие P_K^T при условии, что $T = \sum_{i=1}^K t_i$ — время, отпущенное на поиск. Это простая задача на поиск условного экстремума. Введем обозначения $\tilde{P}_K^T = P_K^T - \lambda \left(\sum_{i=1}^K t_i - T \right)$. Необходимые условия экстремума имеют вид

$$\begin{cases} \tilde{P}_{K_i}^T = c_i (\alpha e^{-\alpha t_i}) - \lambda = 0; \\ \tilde{P}_{K_\lambda}^T = \sum_{i=1}^K t_i - T = 0, i = 1, 2, \dots, K. \end{cases} \quad (16)$$

Уравнения (16) представляют собой систему $K + 1$ уравнений из $K + 1$ неизвестных $t_1, t_2, t_3, \dots, t_K, \lambda$. Ее решением являются значения времени наблюдения за каждой из ячеек:

$$t_i = \frac{T}{K} - \frac{1}{\alpha K} \sum_{j=1}^K \ln \frac{c_j}{c_i}, c_i > 0, i = 1, 2, \dots, K, \quad (17)$$

первый член в этом выражении обозначает среднее время осмотра i -й ячейки, а второй — предпочтение, отдаваемое ячейке с большей вероятностью нахождения в ней цели. Нетрудно также проверить, что условие $T = \sum_{i=1}^K t_i$ выполнено. Заметим, что если $c_i = c = \text{const}$, то время наблюдения распределяется между всеми ячейками поровну $t_i = T/K$, что кажется естественным.

Сделаем одно замечание. Использование известного метода условного экстремума (метод множителей Лагранжа) предполагает наличие ограничений в виде равенств (в нашем случае: $\sum_{i=1}^K t_i = T$). Однако этот метод может привести к физически недопустимым результатам: например, некоторые из результатов могут оказаться отрицательными или нулевыми ($t_i \leq 0$).

Добавление ограничений в виде неравенств (в нашем случае $t_i > 0$) существенно усложняет процедуру поиска. Рассмотрим тогда решение этой проблемы, состоящее в поиске ограничений на параметры, входящие в выражения для оптимальных времен t_i , т. е. T, K, α, c_i , обеспечивающих положительность параметров t_i . Имеем:

$$t_i = \frac{T}{K} - \frac{1}{\alpha} \ln(c_1 c_2 \dots c_K)^{1/K} + \frac{1}{\alpha} \ln c_i.$$

В силу неравенства Коши

$$(a_1 a_2 \dots a_K)^{1/K} \leq \frac{1}{K} (a_1 + a_2 + \dots + a_K)$$

имеем

$$t_i \geq \frac{T}{K} + \frac{1}{\alpha} \ln(K c_i).$$

Таким образом, окончательно имеем следующее ограничение на параметры: $\frac{T}{K} + \frac{1}{\alpha} \ln(K c_i) > 0$, $i = 1, 2, \dots, K$. Здесь параметр T/K означает среднее время, затрачиваемое на осмотр одной ячейки, а параметр $1/\alpha$ — аналог постоянной времени эквивалентного апериодического звена, описывающего работу бортового датчика.

Ясно, что непосредственное использование соотношения $\frac{T}{K} + \frac{1}{\alpha} \ln(K c_i) > 0$ является неприемлемым, поскольку может потребовать изменения параметров для каждой ячейки. Для того чтобы решить эту проблему, воспользуемся следующим подходом. Обозначим $c^* = \min c_i$, тогда имеем: $\frac{T}{K} + \frac{1}{\alpha} \ln(K c^*) > 0$, что и является окончательным результатом исследования.

В. Рассмотрим теперь развитие предыдущей задачи. Пусть агент движется вдоль оси x , осматривая последовательно одну за другой небольшие ячейки, в которых может располагаться цель. Вероятное положение цели задается стационарной плоскостью распределения. Проблема состоит в нахождении скорости движения агента, обеспечивающей максимум вероятности обнаружения цели за заданное время. Рассмотрим сначала дискретный вариант задачи.

Пусть во время ϵ_k датчик находится в ячейке k и просматривает ячейки от k до $k + L - 1$, уже просмотрев до этого ячейки от 1 до $k - 1$ (рис. 5, см. третью сторону обложки).

Здесь вероятности нахождения цели в ячейках обозначены $c_k, c_{k+1}, \dots, c_{k+L-1}$ (мы по-прежнему считаем цель неподвижной), где k — номер ячейки; ε_k — время нахождения датчика над ячейкой k . Обозначим P_k вероятность того, что до ячейки k цель будет найдена. Тогда нетрудно увидеть, что для P_k верно следующее рекуррентное соотношение:

$$P_{k+1} = P_k + (1 - P_k)(1 - e^{-\alpha \varepsilon_{k+1}}) \sum_{i=k+1}^{k+L} c_i, P_0 = 0.$$

Учитывая, что времена ε_i малы, имеем

$$P_{k+1} = P_k + (1 - P_k)\alpha \varepsilon_{k+1} \sum_{i=k+1}^{k+L} c_i, P_0 = 0. \quad (18)$$

Непрерывный аналог последнего соотношения (18) имеет вид

$$P_{t+\varepsilon_t} = P_t + (1 - P_t)\alpha \varepsilon_t \int_{x_t}^{x_t+L} \rho(z) dz, \quad (19)$$

где ε_t — малое время прохождения агентом ячейки; z — положение исследуемой точки вдоль оси x ; $c(z)$ — плотность распределения вероятности нахождения цели; x_t — положение датчика вдоль оси x в момент времени t ; α — условная вероятность обнаружения цели; L — диапазон сканирования датчиков за один просмотр.

Из последнего соотношения нетрудно получить дифференциальное уравнение относительно P_t :

$$\dot{P}_t = (1 - P_t)\alpha \int_{x_t}^{x_t+L} \rho(z) dz, \rho(0) = 0, \quad (20)$$

решением которого является выражение

$$P_t = 1 - e^{-\alpha \int_0^t \int_{x_t}^{x_t+L} \rho(z) dz dt}. \quad (21)$$

Если обозначить вероятность нахождения цели в области видимости датчика, находящегося в момент времени t в точке x_t , как

$$Q_t = \int_{x_t}^{x_t+L} \alpha \rho(z) dz,$$

то соотношение (21) примет вид

$$P_t = 1 - e^{-\int_0^t Q_\tau d\tau}. \quad (22)$$

Максимум P_t в каждый момент времени t достигается тогда, когда максимума в момент t достигнет функция

$$\int_0^t Q_\tau d\tau = \int_0^t \int_{x_\tau}^{x_\tau+L} \alpha \rho(z) dz d\tau. \quad (23)$$

Рассматриваемая задача оптимального поиска состоит в выборе x_t , максимизирующего выражение (23) с учетом соответствующих динамических свойств объекта, несущего на борту датчик обнаружения цели.

Моделирование

Пусть в плоскости находятся $n \times n$ дискретных ячеек, в одной из которых может находиться цель. Вероятность того, что цель находится в определенной ячейке i , равна $c_i, i = 1, 2, \dots, n \times n$, и $c_1 + c_2 + \dots + c_{n \times n} = 1$, время поиска T . Для нахождения оптимального времени поиска цели в каждой ячейке используются формулы (14)—(17). Результат моделирования при $n = 20, T = 400$ с, $\alpha = 0,5$, размере ячейки 1×1 м² показан на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

На рис. 6, *a* вероятность нахождения цели в ячейке представляет собой параболу. Тогда максимальная вероятность обнаружения цели равна 0,4025. Если время поиска равномерно распределяется по каждой ячейке, тогда вероятность обнаружения цели 0,3935. На рис. 6, *b* показаны результат оптимального распределения времени и средняя скорость в каждой ячейке, где сплошная линия соответствует распределению времени, а штриховая — распределению скорости.

На рис. 6, *в* вероятность нахождения цели в ячейке представляет собой прямую линию. Тогда вероятность обнаружения цели равна 0,4050; если время поиска равномерно распределяется по каждой ячейке, тогда вероятность обнаружения цели 0,3935. На рис. 6, *г* показаны результат оптимального распределения времени и средняя скорость в каждой ячейке (сплошная линия соответствует распределению времени, штриховая — распределению скорости).

В случае, когда n велико, следует воспользоваться соотношениями (21)—(23).

Из рис. 6 (см. третью сторону обложки) нетрудно видеть, что чем больше вероятность на-

хождения цели в ячейке и чем меньше скорость движения агента, тем больше вероятность обнаружения цели.

Однако на рис. 6 разница между двумя методами не слишком заметна из-за того, что время поиска достаточно велико. На рис. 7 (см. третью сторону обложки) показаны вероятности нахождения цели при разных временах поиска с помощью предлагаемого метода и метода равномерного распределения времени между ячейками.

Из рис. 7 нетрудно видеть, что если время поиска слишком маленькое или большое, тогда вероятности обнаружения цели либо малы, либо велики, разница между двумя методами небольшая. Когда время поиска среднее, например, около 320 с, тогда разница в вероятностях обнаружения цели достигает 75,3 %. Предлагаемый метод показал свое преимущество перед известными методами.

Заключение

В работе предложен и исследован метод поиска цели и покрытия зоны поиска мобильным роботом с учетом характеристик датчиков и особенностей поисковой зоны. Метод основан на использовании теории вероятности, плотности распределения вероятностей, а также условной вероятности, из которых выведены

формулы вероятности нахождения цели, оптимизирующие скорость поиска. Проведенное моделирование подтверждает правомерность предложенного подхода.

Дальнейшее направление исследований авторы видят в расширении области поиска на прямоугольные зоны с препятствиями, выполнении распределенного кооперативного поиска целей несколькими роботами, а также в нахождении нескольких целей в наблюдаемой зоне.

Список литературы

1. **Инзарцев А. В., Багницкий А. В.** Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2(22). С. 25–35.
2. **Yoonchang Sung, Pratap Tokekar.** Algorithm for Searching and Tracking an Unknown and Varying Number of Mobile Targets using a Limited FoV Sensor // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. Singapore, May 29–June 3.
3. **Frederic Bourgault, Tomonari Furukawa, Hugh F.** Coordinated Decentralized Search for a Lost Target in a Bayesian World // International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2003. Las Vegas, Nevada, October.
4. **Anxing Shan, Xianghua Xu, Zongmao Cheng.** Target Coverage in Wireless Sensor Networks with Probabilistic Sensors // Sensors (Basel). 2016. № 16(9). С. 1372–1393.
5. **Wang B.** Coverage problems in sensor networks: A survey // ACM Computing Surveys. 2011. № 43(4). С. 32–51.
6. **Kamrani F.** Using on-line simulation in UAV pathing planning // 2007 Winter Simulation Conference. 2007. Washington. DC. USA. December 9–12.
7. **William Feller.** An Introduction to Probability Theory and Its Applications. Vol. 1. M.: Wiley. 3rd Edition. 1968.

The Movement Planning of Mobile Robots in Performing Search Task Based on Probability Theory

S. L. Zenkevich, zenkev@bmstu.ru, **A. V. Nazarova**, avn@bmstu.ru, **Meixin Zhai**, 982696853@163.com, Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Meixin Zhai, Ph.D., Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: 982696853@163.com

Accepted on May 15, 2019

Abstract

The article is devoted to the development of searching and covering task in different areas, for example, for extinguishing fires, during search operations in the air, on the ground, etc. Two probabilistic models were created based on the characteristics of the sensors and the search zone, that is, the probability density of the target position and the conditional probability of detecting the target by the sensor under the conditions that the target is at the point of observation (depending on the distance between the sensor and the point of observation). Based on these models, the parameters and the search procedure were analyzed; more precisely, the relationship and formulas between the target detection probability, the search time and other parameters were found. The main difference of the proposed research lies in the fact that by optimizing the obtained relations and formulas it is possible to obtain an optimal distribution of time in the search process, as a result, to increase the probability of target detection. In the research process, at first, the case where the distribution probability of

target position in the search area represents a discrete form (network map) is investigated, then a formula for the probability of target detection in a discrete and continuous probe is obtained. Using the method of Lagrange multipliers and dynamic programming, the optimal distribution of search time in each cell was obtained. Further, according to the result obtained, the study was expanded to a continuous distribution probability of target position in the search area, the functional probability of detecting the target of search time, probability density of target and the search trajectory (velocity) was derived. As a result of solving this functional, for a given search time and probability density distribution of target, optimal control (trajectory and speed) was obtained. The simulation confirmed the efficiency of the proposed search method. The simulation result shows that the greater the probability density of target and the slower the agent's movement speed, the greater the probability of target detection, for some values of the search parameters, the difference in probabilities of target detection reaches 75.3 %.

Keywords: search target, probability theory, movement planning, optimal distribution, conditional probability

For citation:

Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Meixin Zhai. The Movement Planning of Mobile Robots in Performing Search Task Based on Probability Theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 9, pp. 560–567.

DOI: 10.17587/mau.20.560-567

References

1. Inzartsev A. V., Bagnitsky A. V. The trajectories planning and implementation of autonomous underwater robot of performing monitoring in different types of waters, *Underwater Research and Robotics*, 2016, no. 2(22), pp. 25–35 (in Russian).

2. Yoonchang Sung, Pratap Tokekar. Algorithm for Searching and Tracking an Unknown and Varying Number of Mobile Targets

using a Limited FoV Sensor, *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, Singapore May 29–June 3.

3. Frederic Bourgault, Tomonari Furukawa, Hugh F. Coordinated Decentralized Search for a Lost Target in a Bayesian World, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003, Las Vegas, Nevada, October.

4. Anxing Shan, Xianghua Xu, Zongmao Cheng. Target Coverage in Wireless Sensor Networks with Probabilistic Sensors. *Sensors (Basel)*, 2016, no. 16(9), pp. 1372–1393.

5. Wang B. Coverage problems in sensor networks: A survey, *ACM Computing Surveys*, 2011, no. 43(4), pp. 32–51.

6. Kamrani F. Using on-line simulation in UAV pathing planning, *2007 Winter Simulation Conference*, 2007, Washington, DC, USA, December 9–12.

7. William Feller. *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, vol. 1, Moscow, Wiley, 1968.



27 ноября 2019 г. в ГК «ИЗМАЙЛОВО» (г. Москва) состоится

Десятая Межотраслевая конференция «АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА-2019»,

посвященная демонстрации современных программ, приборов, систем и решений для автоматизации предприятий энергетики, машиностроения, металлургии, химической, нефтегазовой, цементной и других отраслей промышленности.

Темы докладов конференции

- Актуальные задачи автоматизации в промышленности
- Информационно-управляющие системы промышленной автоматизации (АСУ ТП, АСОДУ, ERP, CRM, MES, АСКУЭ, ПАЗ, РЗА, SCADA и др.)
- Опыт внедрения различных информационных систем на предприятиях машиностроения, энергетики, металлургии, нефтегазовой, оборонной и др. отраслей промышленности
- Теория и практика управления информационной безопасностью промышленных предприятий
- Отечественные и зарубежные контрольно-измерительные приборы
- Автоматизация электроснабжения промышленных предприятий. Системы энергоменеджмента
- Программные средства поддержки проектирования, измерений и испытаний
- Системы управления нормативно-справочной информацией

Контактная информация:

тел.: + 7 (905) 567-8767; e-mail: admin@intecheco.ru