

## РАЗДЕЛ 2. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.896

### ОРИЕНТАЦИЯ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОМОЩИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ С ЭЛЕМЕНТАМИ МОДЕЛИ МИРА

Д.А. Рогаткин, Д.Г. Лапитан

*Разработан способ и аппаратно-программный модуль автономного мобильного робота для ориентации в помещении комнатного типа. Использован вероятностный алгоритм ориентации с учетом погрешностей измерений датчиков расстояния и одометрии и возможностью распознавания помещений по их характерным метрическим признакам, заложенным во внутреннюю модель мира робота.*

*Ключевые слова: автономный мобильный робот, модуль ориентации, объектно-ориентированная карта, координаты робота, датчик расстояния, модель мира.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Разработка системы навигации и ориентации автономного мобильного робота (АМР) в помещениях в условиях отсутствия их специальной подготовки (нанесения меток, установки дополнительного навигационного оборудования и т.п.) является одной из типовых и ключевых задач современной сервисной робототехники [1, 2]. Например, для сервисных медицинских роботов около 75 % всех функций сконцентрировано на задачах ориентации и перемещения в помещении коридорно-комнатного типа [3]. Эта задача весьма универсальна для АМР, полна, конечна и является, поэтому, хорошей моделью для экспериментальной проверки положений любой инженерной теории АМР. Кроме того, задача навигации и ориентации АМР в пространстве является сопряженной к задаче распознавания карты местности. Особенно интересно это сопряжение в свете лидирующей сегодня парадигмы объектно-ориентированного описания карты местности и среды обитания роботов целом, когда роботу необходимо «отдавать себе отчет», в каком помещении (комнате) он находится в данный момент времени [4]. Разработанный модуль ориентации [5] с элементами модели мира (ММ) позволяет решать такие задачи.

#### ОСНОВНАЯ ИДЕЯ

Рассматривалось перемещение АМР в помещении коридорно-комнатного типа по поверхности одного этажа в отсутствие в поле зрения АМР других перемещающихся объек-

тов (людей, механизмов). В качестве примера помещений рассматривался коридор с одной смежной комнатой. Любое другое количество помещений и их конфигурация легко обобщаются на основе этого примера. При автономном передвижении АМР должен уметь определять свое местоположение на карте с заданной точностью. Соответственно, в памяти АМР должна существовать план-карта помещения и правила перемещения по ней – некая ММ. Принцип ее формирования также составлял предмет исследования в данной работе. Основной трудностью в такой задаче является решение двух проблем: (1) реальные сенсорные системы АМР работают с погрешностью измерений, поэтому АМР должен учитывать их наличие; (2) при потере ориентации, например, из-за ошибок определения координат, АМР должен уметь восстанавливать свое местоположение на карте без использования какой-либо дополнительной информации, не внесенной в описание его ММ.

Для решения этих проблем была выполнена разработка вероятностного объектно-ориентированного алгоритма на основе показаний датчиков расстояний (ультразвуковых (УЗ) дальномеров) и датчиков перемещений (одометрии). Была проведена адаптация разработанного алгоритма для использования в составе современной встраиваемой системы. Вероятностный подход к локализации робота состоит в следующем. Так как дальномеры и датчики одометрии имеют погрешности измерений, показания этих датчиков можно представить в виде случайных величин, распределение которых зависит как от конструкции

самих датчиков, так и от положения АМР на карте местности. Положение робота не может быть известно точно, однако можно представить его в виде вероятностного распределения с плотностью “ $p$ ”, заданного на некотором пространстве “ $X$ ”. В случае ориентации на плоскости  $X \subset \mathbb{R}^3$ : положение АМР однозначно задаётся двумя декартовыми координатами и углом поворота  $\theta$ . В этом случае плотность распределения  $p=p(x,y,\theta)$ . Пусть АМР находится в точке  $(x,y,\theta) \in X$ . Тогда показание, например, дальномера  $z$  – случайная величина с распределением  $p=p(z|x,y,\theta)$ . Обновление априорной плотности распределения  $p$  после получения показаний дальномера  $z$  определяется по известной формуле Байеса:

$$\tilde{p}(x,y,\theta) = \frac{p(z|x,y,\theta)p(x,y,\theta)}{\int_x p(z|x,y,\theta)p(x,y,\theta)dx dy d\theta} = \alpha \cdot p(z|x,y,\theta)p(x,y,\theta)$$

В практических применениях интеграл в знаменателе вычислять не требуется, а  $\alpha$  находится из условия нормировки:

$$\int_X \tilde{p}(x,y,\theta) dx dy d\theta = 1$$

Повторяя измерение  $n$  раз, получим:

$$\tilde{p}(x,y,\theta) = \alpha(n) p^n(z|x,y,\theta)$$

При  $n \rightarrow \infty$  предельная мера концентрируется в малой окрестности множества:

$$\arg \max_{x,y,\theta} p(z|x,y,\theta)$$

Естественно полагать, что максимум  $p(z|x,y,\theta)$  достигается в точках, при измерении из которых истинное расстояние до препятствия не сильно отличается от  $z$ . Таким образом, показания  $z$  всегда уточняют положение робота в пространстве, и в случае если робот неподвижен, проводя измерения достаточно большое количество раз, можно определить расстояние до стен с любой заданной достоверностью оценки.

Эти же датчики используются для идентификации номера помещения по карте, в котором находится АМР. Для этого каждому помещению для целей идентификации присваиваются его характерные идентификационные признаки на плоскости – длина  $L$  и ширина  $W$ , которые АМР может легко измерять и определять при движении, если в его аппаратную часть включить 4 датчика расстояния – вперед-назад и вправо-влево.

### АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Аппаратная реализация модуля ориентации АМР показана на рисунке 1. Модуль 1 размещается на тележке робота 2, содержащей электромоторы с системами одометрии 3а и 3б. Модуль содержит 4 стандартных УЗ датчика расстояния 4а, 4б, 4в, 4г типа

HCSR04, расположенных на тележке так, чтобы имела возможность измерения расстояний до предметов и стен в помещении в 4-х взаимно перпендикулярных направлениях. Также модуль содержит бортовой компьютер 5 для вычислений и управления УЗ датчиками расстояния и движением тележки, в который заложена геометрическая карта-план помещений в виде матрицы смежности и условий перехода, а также алгоритм управления перемещением робота. Выходы УЗ датчиков и системы одометрии подключены ко входам бортового компьютера 5а, а выходы компьютера 5б подключены ко входам устройств запуска УЗ датчиков на измерение и управления моторами.

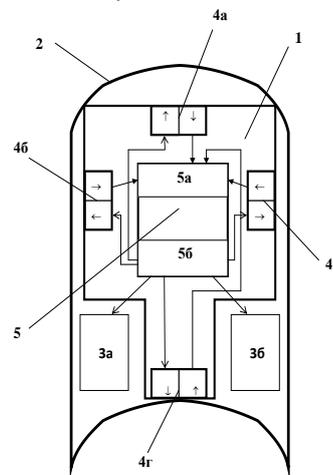


Рисунок 1 – Конструкция модуля системы ориентации АМР

Карта-план помещений (ММ) представляет собой список объектов – комнат и коридоров – с присвоенными им отличительными признаками: условными номерами, шириной  $W$  и длиной  $L$  в метрах, номером соседнего помещения с которыми данное помещение соединено входом, а также левыми  $\{X;Y\}_L$  и правыми  $\{X;Y\}_R$  координатами входа в помещение относительно декартовых осей  $X$  и  $Y$ , расположенных по двум примыкающим друг к другу стенкам помещения – передней ( $X$ ) и левой ( $Y$ ) соответственно. Сказанное поясняет рисунок 2. Каждое из двух помещений в этом примере – комната 1 и коридор 2 – имеют свою систему координат  $\{X_1;Y_1\}$  и  $\{X_2;Y_2\}$ , а также свою ширину и длину  $\{W_1, L_1\}$  и  $\{W_2, L_2\}$ .

Проход 3 из коридора 2 в комнату 1 задается координатами  $\{X_{1L};Y_1=0\}_L$  и  $\{X_{1R};Y_1=0\}_R$  в системе координат комнаты 1, которые легко пересчитываются в систему координат коридора 2, т.к. известны  $W_2$  и смещение  $D_{1-2}$  координаты  $\{X_1=0\}$  относительно  $\{X_2=0\}$ . Комната и коридор могут дополнительно содержать мебель 4, координаты которой на карте не задаются. Тележка АМР 5 в начальный момент времени осуществляет свое движение, напри-

## ОРИЕНТАЦИЯ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОМОЩИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ С ЭЛЕМЕНТАМИ МОДЕЛИ МИРА

мер, по коридору 2 вправо со скоростью  $V$  (рисунок 2). При этом в памяти АМР в качестве текущей переменной выступает номер помещения, в котором находится АМР (№2 в данном случае), а длина ( $L_2$ ) и ширина ( $W_2$ ) этого помещения известны устройству из карты помещений.

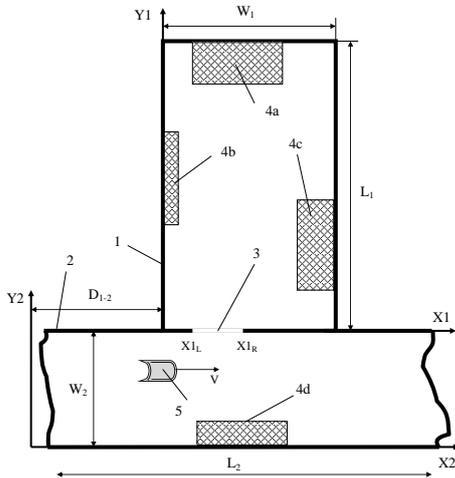


Рисунок 2 – Принцип формирования объектно-ориентированной карты помещений

### ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

В случае простого прямолинейного движения тележки робота (рисунок 3а) бортовой компьютер постоянно в цикле выдает сигнал запуска измерений на каждый датчик и опрашивает все свои датчики, получая информацию о расстояниях до стен вперед ( $r_f$ ), назад ( $r_b$ ), вправо ( $r_r$ ) и влево ( $r_l$ ). Поскольку каждое измерение  $r_i$  не может быть выполнено абсолютно точно и обычно содержит некоторую погрешность (неточность) измерений  $\Delta r_i$ , текущие координаты тележки АМР в системе координат  $\{X_2; Y_2\}$  для уменьшения ошибки ориентации определяются как среднее арифметическое по результатам 2-х измерений. 1-е измерение:

$$X2_1 = r_b \pm \Delta r_b; Y2_1 = r_r \pm \Delta r_r \quad (1),$$

где  $\Delta r_b$  и  $\Delta r_r$  – возможные (типичные) погрешности измерений расстояний назад ( $b$ ) и вправо ( $r$ ) (определяются при испытаниях тележки робота, содержащей модуль ориентации); 2-е измерение:

$$X2_2 = W_2 - (r_l \pm \Delta r_l); Y2_2 = L_2 - (r_f \pm \Delta r_f) \quad (2),$$

где  $\Delta r_l$  и  $\Delta r_f$  – возможные (типичные) погрешности измерений расстояний вперед ( $f$ ) и влево ( $l$ ) (также определяются при испытаниях тележки робота); и усреднение:

$$X2 = (X2_1 + X2_2) / 2 \quad (3)$$

$$Y2 = (Y2_1 + Y2_2) / 2 \quad (4).$$

При этом дополнительно в каждом цикле измерений контролируются соотношения:

$$L_2 - \Delta L_2 \leq r_b \pm \Delta r_b + r_r \pm \Delta r_r \leq L_2 + \Delta L_2 \quad (5)$$

$$W_2 - \Delta W_2 \leq r_l \pm \Delta r_l + r_f \pm \Delta r_f \leq W_2 + \Delta W_2 \quad (6),$$

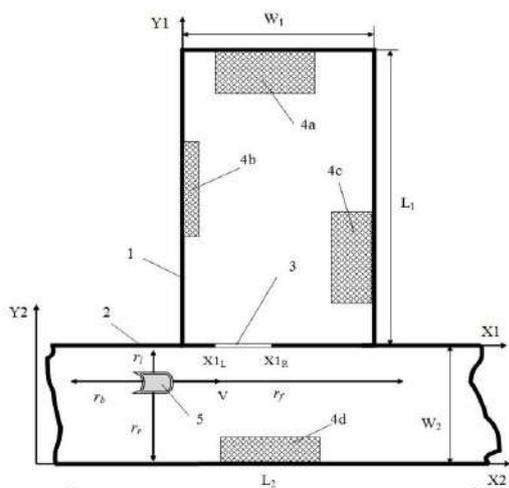
где  $\Delta L_2$  и  $\Delta W_2$  – допустимые погрешности измерений геометрических размеров помещений (задаются разработчиком робота). Проверка условий (5) и (6) постоянно «подтверждает» тележке АМР ее местоположение на карте – факт нахождения в коридоре 2 с геометрическими размерами  $L_2$  и  $W_2$ . Размерами самого робота в данном алгоритме пренебрегаем. Считаем, что все расстояния датчиками определяются с учетом известных габаритов робота, т.е. все расстояния отсчитываются от центра масс робота.

Далее, если роботу требуется перейти в помещение 1, то в один из моментов времени своего движения он окажется в положении справа от прохода (рисунок 3б). Проход в рамках описания данного алгоритма предполагается всегда свободным, т.е. дверь отсутствует. В этот момент времени показания боковых УЗ датчиков расстояния АМР в сумме перестанут удовлетворять условию (6). Это произойдет даже в случае, если справа от устройства по «глухой» стене окажется какой-либо небольшой предмет-препятствие 4d, меняющий показания  $r_r$  (см. рисунок 3б). Все равно сумма расстояний  $r_r$  и  $r_l$  окажется много больше ширины коридора  $W_2 + \Delta W_2$ . Это будет означать, что слева от тележки робота обнаружен проход в помещение 1. В этом случае модуль ориентации запоминает текущие величины расстояний  $r_r = r_1^*$  и  $r_l = r_2^*$ , поворачивает тележку влево на  $90^\circ$  так, что становятся верными вместо них значения  $r_b = r_1^*$  и  $r_f = r_2^*$  и центрует свое положение по оси  $X$  по центру прохода, основываясь на известных координатах прохода  $\{X1_L; Y1=0\}_L$  и  $\{X1_R; Y1=0\}_R$ . Координата  $X2$  робота в этом случае будет определяться простым соотношением:

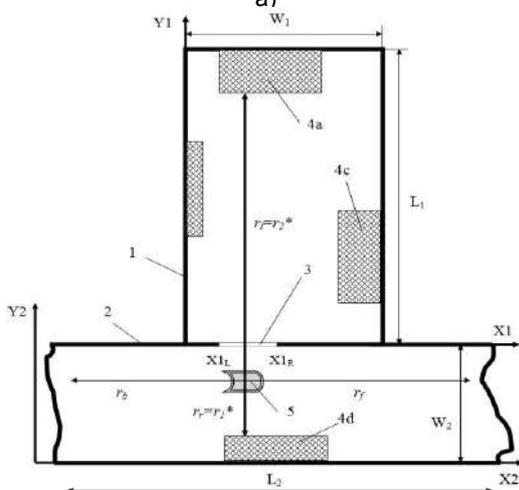
$$X2 = D_{1-2} + (X1_L + X1_R) / 2 \quad (7).$$

После этого АМР въезжает в помещение 1 на глубину  $S$  (рисунок 4) и контролирует и определяет глубину  $S$  по показаниям  $r_b$  и  $r_f$  аналогично алгоритму по формулам (1)–(4).

Сам момент пересечения линии прохода 3 определяется тележкой АМР по резкому уменьшению, а затем резкому увеличению показаний боковых УЗ датчиков расстояний – в момент пересечения прохода они в сумме покажут его ширину. В этот момент времени координата  $Y1$  тележки робота принимается равной нулю ( $Y1=0$ ) и запоминаются показания  $r_b = r_3^*$  и  $r_f = r_4^*$ .



а)



б)

Рисунок 3 – Принцип измерения роботом расстояний до стен в объектно-ориентированной карте помещений: а) в положении робота в начале его движения по комнате 2; б) в положении робота напротив прохода 3 в комнату 1

Следующим этапом роботу необходимо определить значение своей координаты  $Y_1$ , т.к. только из смещения  $S$  (см. рисунок 4) нельзя прямо вычислить координату  $Y_1$ , а значение координаты  $X_1$  уже известно из условия входа тележки АМР в комнату 1 прямо по центру прохода 3, т.е. из (7) прямо следует:

$$X_1 = (X_{1L} + X_{1R}) / 2 \quad (8)$$

Координата  $Y_1$  тележки с роботом определяется снова как среднее арифметическое из двух измерений и вычислений:

измерение 1:  $Y_{1_1} = (r_b \pm \Delta r_b) - r_3^*$ , где  $(r_b \pm \Delta r_b)$  – текущий результат измерений расстояния назад;

измерение 2:  $Y_{1_2} = r_4^* - (r_f \pm \Delta r_f)$ , где  $(r_f \pm \Delta r_f)$  – текущий результат измерений расстояния вперед;

$$Y_1 = (Y_{1_1} + Y_{1_2}) / 2 \quad (9)$$

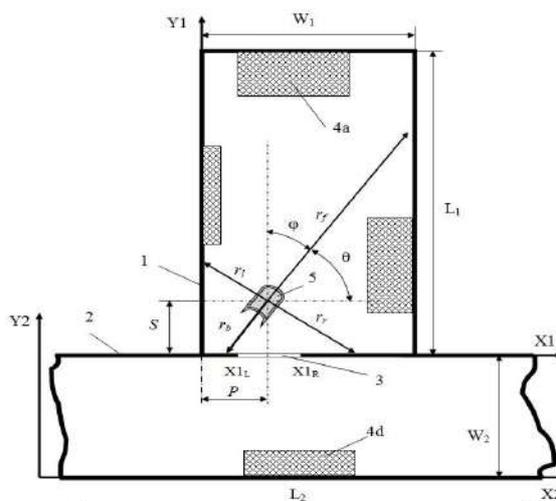


Рисунок 4 – Угловое сканирование комнаты роботом для ее идентификации в объектно-ориентированной карте помещений

Далее роботу необходимо проверить размеры комнаты 1 по показаниям УЗ датчиков расстояния и сравнить их с известными значениями из карты по аналогии с проверкой соотношений (5) и (6), чтобы убедиться, что он действительно находится в комнате 1. Однако может оказаться, что сзади, спереди и/или сбоку от тележки с роботом, как показано на рисунке 4, находятся еще и другие предметы мебели или другие препятствия/предметы, не позволяющие АМР сразу измерить размер помещения с заданной точностью. Тогда тележка с роботом 5 начинает поворачиваться вокруг своей оси, например, вправо на угол  $\varphi$  (см. рисунок 4), производя измерения и вычисляя размер комнаты из простых геометрических формул. Сравнивая вычисленные размеры с известными из карты размерами в зависимости от угла поворота робота можно, проводя сканирование по углу  $\varphi$ , получить совпадение с размерами из карты с заданной точностью, или не получить совпадений никогда, если тележка АМР находится в другом помещении. Здесь при сканировании по углу  $\varphi$  может быть несколько вариантов измерения расстояний. Однако все эти варианты очевидны, набор их конечен, поэтому все вычисления для всех вариантов легко могут быть выполнены бортовым компьютером АМР. Например, для рисунка 4 ширина комнаты, определяемая как

$$W_1 = (r_f \pm \Delta r_f) \cos(\theta) + (r_b \pm \Delta r_b) \cos(\varphi) \quad (10)$$

где  $\varphi + \theta = 90^\circ$ , даст правильный результат в пределах допустимой заданной погрешности  $\Delta W_1$ . Длина комнаты, определяемая как

$$L_1 = (r_f \pm \Delta r_f) \cos(\varphi) + (r_b \pm \Delta r_b) \cos(\theta) \quad (11)$$

даст правильный результат в пределах допустимой заданной погрешности  $\Delta L_1$ . В слу-

чае наличия препятствия на пути какого-либо направления измерений, размеры, вычисленные с помощью этого направления, окажутся несовпадающими с размерами помещения, указанными на карте. В этом случае принимается решение о номере комнаты по вычислениям по другим размерам, либо тележка робота поворачивается на другой угол, проводя новые вычисления, до получения надежных совпадений, либо до полного своего поворота вокруг оси на  $360^\circ$ . В последнем случае, если не удалось получить при полном повороте достоверных совпадений ни в каких измерениях, делается вывод об ошибке текущего номера помещения.

Этот же алгоритм простых геометрических расчетов позволяет тележке АМР, если она «потеряла» ориентацию, полностью определить заново свои координаты  $(x, y)$  и угол поворота  $(\varphi)$  в любом помещении, зная только номер помещения, в котором она находится, и его линейные геометрические размеры (ширину  $W$  и длину  $L$ ). Это выполняется по следующему алгоритму. На основании показаний УЗ датчиков расстояния составляется функция ошибки  $E(x, y, \theta)$ , определенная для каждой точки комнаты и каждого угла поворота робота  $\varphi$  с учетом  $\varphi + \theta = 90^\circ$ . Функция ошибки представляет собой сумму квадратов отклонений показаний датчиков  $r_f, r_b, r_r, r_l$  от истинных расстояний до стен  $R_f, R_b, R_r, R_l$  по направлениям измерений:

$$E(x, y, \theta) = (R_f - r_f)^2 + (R_l - r_l)^2 + (R_b - r_b)^2 + (R_r - r_r)^2 \quad (12)$$

Истинные расстояния до стен определяются из общих геометрических соотношений следующим образом:

$$\begin{aligned} R_f &= \min \left( \frac{L \cdot I_{[0, \pi]}(\theta) - y}{\sin(\theta)}, \frac{W \cdot I_{\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]}(\theta) - x}{\cos(\theta)} \right) \\ R_l &= \min \left( \frac{L \cdot I_{[0, \pi]} \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) - y}{\sin \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right)}, \frac{W \cdot I_{\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]} \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right) - x}{\cos \left( \theta + \frac{\pi}{2} \right)} \right) \\ R_b &= \min \left( \frac{L \cdot I_{[0, \pi]}(\theta + \pi) - y}{\sin(\theta + \pi)}, \frac{W \cdot I_{\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]}(\theta + \pi) - x}{\cos(\theta + \pi)} \right) \\ R_r &= \min \left( \frac{L \cdot I_{[0, \pi]} \left( \theta + 3 \frac{\pi}{2} \right) - y}{\sin \left( \theta + 3 \frac{\pi}{2} \right)}, \frac{W \cdot I_{\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]} \left( \theta + 3 \frac{\pi}{2} \right) - x}{\cos \left( \theta + 3 \frac{\pi}{2} \right)} \right) \end{aligned} \quad (13),$$

где  $I_{[a, b]}(\theta)$  – индикатор множества  $[a, b]$  такой, что:

$$I_{[a, b]}(\theta) = \begin{cases} 1, \theta \in [a + 2\pi k, b + 2\pi k], k \in Z, \\ 0, \theta \notin [a + 2\pi k, b + 2\pi k], k \in Z. \end{cases}$$

где  $Z$  – множество всех целых чисел.

Далее одним из известных численных методов, например, методом градиентного

спуска [6], находится минимум функции ошибки по (12) при каком-то конкретном наборе координат. Эти координаты

$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta}) = \arg \min_{x, y, \theta} E(x, y, \theta) \quad (14)$$

и являются решением задачи определения координат тележки робота в любой заданной комнате с помощью данного алгоритма.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный модуль ориентации функционально позволяет с заданной точностью, достаточной для практического применения, определять координаты тележки АМР на карте местности и ее угловое положение при перемещении тележки робота по горизонтальной поверхности в заданном помещении коридорно-комнатного типа. Также алгоритм позволяет роботу распознавать помещения и позиционировать свою тележку в них в терминах объектно-ориентированной модели помещения, как элемента общей ММ робота.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-08-01127.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами. / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов, Б. Е. Федунцов. – М.: Физико-математическая литература, 2000. – 352 с., ил.
2. Крючков, Б. И. Концептуальные подходы к применению сервисных роботов: общность проблем внедрения (на примерах пилотируемой космонавтики и высокотехнологической медицины) / Б. И. Крючков, А. А. Карпов, А. В. Поляков, Д. А. Рогаткин, В. М. Усов // Биотехносфера. – 2013. – № 6(30). – С. 48–59.
3. Рогаткин, Д. А. Концепция мобильных автономных сервисных роботов для медицины / Д. А. Рогаткин, Д. Г. Лапитан, Л. Г. Лапаева. // Биомед. Радиоэлектроника. – 2013. – № 5. – С. 46–56.
4. Рогаткин, Д. А. Среда обитания сервисных медицинских роботов в клинике / Д. А. Рогаткин, Д. Г. Лапитан. // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 233–238.
5. Патент на полезную модель РФ №139571, от 19.12.13. Устройство ориентации и навигации тележки мобильного робота при его перемещении по горизонтальной поверхности в заданном помещении / А. Д. Рогаткин, Д. Г. Лапитан; заявитель и патентообладатель Рогаткин А. Д.; опублик. 20.04.14. Бюл. № 11. – 2 с.
6. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с., ил.

**Рогаткин Д.А.** – д.т.н., доцент, ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, лаборатория медико-физических исследований, e-mail: rogatkin@monikiweb.ru.

**Лапитан Д.Г.** – научный сотрудник, ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, лаборатория медико-физических исследований, тел. (495)6818984, e-mail: lapitandenis@mail.ru.