

На правах рукописи

Минин Андрей Анатольевич

**НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ  
РОБОТОМ, ОСНАЩЕННЫМ ЛАЗЕРНЫМ  
ДАЛЬНОМЕРОМ**

Специальность 05.02.05.

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА – 2008

**Работа выполнена в Московском государственном  
техническом университете им. Н.Э, Баумана**

Научный руководитель

Доктор физико-математических  
наук, профессор  
**Зенкевич Станислав  
Леонидович**

Официальные  
оппоненты

Доктор технических наук,  
профессор  
**Романов Михаил Петрович.**

Кандидат технических наук,  
доцент  
**Ермолов Иван Леонидович**

Ведущая организация

ИПМех РАН

Защита состоится «15» апреля 2008 года в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул. д. 5.

Отзыв на реферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим отсылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул. д. 5, ученому секретарю совета Д 212.141.02, ауд. 613М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан «12» марта 2008 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

\_\_\_\_\_ **Иванов В. А.**

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность.** Одна из наиболее динамично развивающихся областей робототехники на сегодняшний день это мобильная робототехника. Происходит переход от мобильных роботов (МР), дистанционно управляемых оператором, к роботам, способным выполнять движение в автоматическом режиме. Решение этой задачи стало возможно благодаря развитию информационных систем мобильных роботов, включающих приводные, сенсорные и вычислительные системы.

Работа направлена на поиск новых и усовершенствование существующих методов обработки информации от датчиков и автоматического управления МР. В частности, решается задача навигации и управления МР, оснащенным лазерным дальномером, в заранее неизвестной искусственной среде (производственное или офисное помещение),

Проблема навигации и управления МР является очень важной и перспективной для научного исследования. Последнее время исследования в этой области ведутся во многих научных центрах мира, в том числе в МГТУ им. Баумана, ИПМ им. Келдыша, ИПМех РАН, ЦНИИ РТК, в университетах США – Карнеги Меллон (Carnegie Mellon University), Стэнфорд (Stanford University), Германии – Бонн (University of Bonn), Австралии – Сидней (The University of Sidney).

**Цели и задачи.** Целью диссертационной работы является решение задачи навигации МР в искусственной среде по данным сканирующего лазерного дальномера и информации от других датчиков, а также разработка методов управления МР по дальнометрическим данным.

В соответствии с этим в работе поставлены и решены следующие задачи.

- Анализ существующих методов решения задачи навигации.
- Разработка метода определения линейной и угловой скоростей мобильного робота по данным лазерного дальномера и решение задачи локализации.
- Разработка методов комплексирования данных дальномера с информацией от других датчиков робота.
- Разработка методов управления движением робота и планирования пути в заданную точку на карте.
- Проведение экспериментальных исследований на компьютерной модели и на макете мобильного робота.

**Методы исследования.** В работе использованы классические подходы к решению задач кинематики плоского движения твердого тела, методы рекуррентной фильтрации Р. Калмана, вероятностные методы, основанные на правиле Байеса, методы теории управления и др. Достоверность полученных результатов подтверждается численными и натурными экспериментами.

### **На защиту выносятся**

1. Способ определения линейной и угловой скоростей МР по данным лазерного дальномера.
2. Метод решения задачи локализации мобильного робота.
3. Метод определения точностных статистических характеристик решения навигационной задачи.
4. Метод комплексирования данных дальномера с информацией от других датчиков робота.
5. Методы планирования пути и управления движением мобильного робота по карте.

### **Научная новизна результатов исследования**

Разработан новый метод решения задачи определения положения мобильного робота, позволяющий не только получить оценки текущих скоростей и положения робота, но и характеризующую эти оценки матрицу ковариации ошибок оценок. Эта характеристика зависит от движения робота и характера рельефа и может быть получена непосредственно при решении задачи локализации. Её использование играет ключевую роль при комплексировании данных дальномера с информацией от других датчиков и для решения задачи глобальной навигации МР. Кроме того, разработанный метод позволяет аналитически исследовать зависимость дальнометрического изображения от движения МР и характера рельефа.

Разработан метод комплексирования информации от различных датчиков МР, повышающий точность решения навигационной задачи.

**Практическая ценность работы.** Результаты исследований могут быть использованы при создании систем управления МР, оснащенных лазерным дальномером, предназначенных для работы в условиях помещений или улицы с плоской поверхностью движения. Внедрение разработанных методов позволит облегчить работу оператора путем автоматизации процесса движения робота.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертации были использованы в рамках НИР, проходившей в НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э.Баумана. Создан макет МР, оснащенный лазерным сканирующим дальномером, способный решать задачи навигации: определения собственного положения, построения карты и автоматического управления.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на научных форумах: научной школе-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы» (Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова, 23-24 октября 2006 года); 18-ой научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК, 10-11 апреля 2007 года); научном семинаре «Механика и управление в робототехнических системах» под руководством профессора Платонова А. К. (Москва, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 1 ноября 2007 года).

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 3 публикациях.

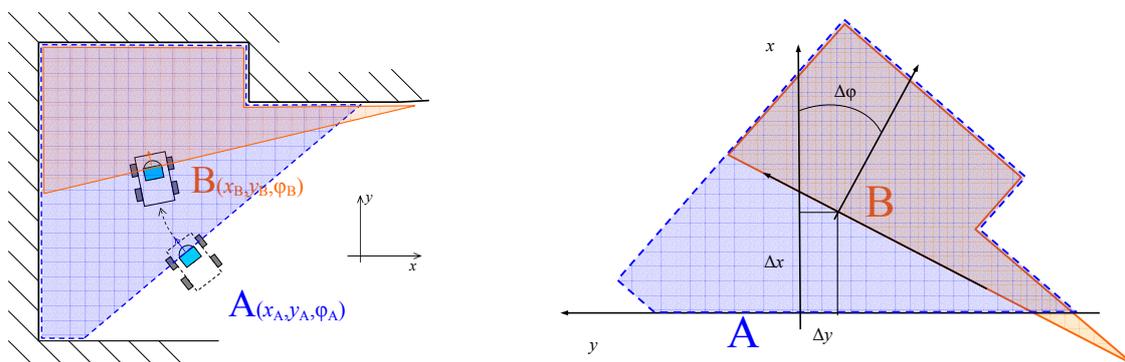
**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 35 наименований, и приложения. Работа изложена на 182 листах машинописного текста и содержит 58 рисунков, 2 таблицы.

### ***Краткое содержание работы***

**Во введении** обоснована актуальность работ по исследованию методов управления и навигации мобильных роботов, сформулированы основные задачи диссертации, приведена структура работы.

**В первой главе** приведены примеры существующих разработок мобильных роботов, использующих датчики различных типов, в том числе, лазерные сканирующие дальномеры.

Рассмотрена задача навигации мобильного робота, решаемая в искусственной среде, где поверхность движения представляет собой плоскость, и лазерный дальномер установлен на роботе для измерения дальностей до окружающих объектов в плоскости параллельной плоскости движения. Задача навигации состоит из подзадач определения положения робота – локализации, и составления описания окружающей среды – картографии. Задача локализации решается за счет определения взаимного расположения дальнометрических изображений (сканов), полученных в различных точках рабочей зоны (рис. 1).



*Рис. 1. Определение перемещения робота по сканам.*

В главе показано, что задача картографии непосредственно связана с задачей локализации, поэтому после определения собственного положения МР дальнометрические изображения, полученные в различных точках рабочей зоны, могут быть приведены к общей неподвижной системе отчета, формируя, таким образом, план местности.

Рассмотрены задачи локальной и глобальной навигации МР. Задача локальной навигации, состоящая в определении относительного перемещения робота по последовательно получаемым сканам, имеет существенный недостаток – накапливающуюся ошибку. Это может приводить к тому, что при повторном прохождении одних и тех же участков рабочей зоны будет наблюдаться несоответствие данных дальномера (рис. 2), карта, построенная по таким данным, будет неточной. Решением этой

проблемы, называемой также проблемой замыкания циклов, занимается задача глобальной локализации, в которой определяется абсолютное положение робота.

Рассмотрены следующие известные методы решения задачи локальной навигации и их основные недостатки. Метод минимизации функции различия двух дальнометрических изображений и метод итеративного сближения двух наборов точек (ICP), характерным недостатком которых является возможность схождения к локальному минимуму при поиске экстремума. Метод определения изменения положения МР за счет сопоставления похожих особенностей рельефа, основная проблема которого связана с определением и идентификацией одинаковых особенностей рельефа на разных дальнометрических изображениях. Кроме того, в рассмотренных методах для получения оценки качества решения задачи локализации, необходимой при решении задачи глобальной навигации, требуются дополнительные вычисления.

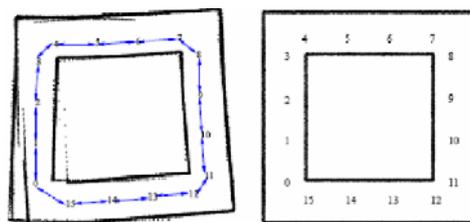


Рис. 2. Проблема замыкания циклов.

В главе также приведены существующие решения проблемы глобальной навигации, основанные на использовании вероятностных методов и правила Байеса. Например, метод фильтрации Калмана, который оценивает позицию МР совместно с положением некоторых маяков, которыми могут быть характерные особенности рельефа, и его аппроксимация – так называемый фильтр частиц (*particle filter*). Эти методы оценивают несколько гипотез о текущем положении МР, и их работа опирается на результаты локальной навигации, с учетом её неточности.

**Во второй главе** предлагается новый подход к решению задачи локальной навигации – за счет определения линейной и угловых скоростей МР по дальнометрическим измерениям.

Рассмотрены две математические модели движения МР в плоском рельефе: движение робота с двумя ведущими колесами без проскальзывания, когда вектор линейной скорости начала связанной системы координат робота совпадает с направлением дальномера (рис. 3а) и более общий случай – движение робота с проскальзыванием, когда вектор скорости имеет две проекции на координатные оси, связанные с дальномером (рис. 3б).

Уравнение движения МР в абсолютных координатах для первого и второго случая имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_o = v \cos \varphi \\ \dot{y}_o = v \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \omega \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} \dot{x}_{o_L} = v_x \\ \dot{y}_{o_L} = v_y \\ \dot{\varphi}_{o_L} = \omega \end{cases}$$

где  $x_o, y_o, \varphi$  – абсолютные координаты центра О робота,  $x_{o_L}, y_{o_L}, \varphi_{o_L}$  –

координаты центра дальномера,  $v$  – скорость начала связанной системы координат (в дальнейшем линейная скорость МР) в первом случае,  $v_x, v_y$  – составляющие вектора скорости во втором случае,  $\omega$  – угловая скорость МР.

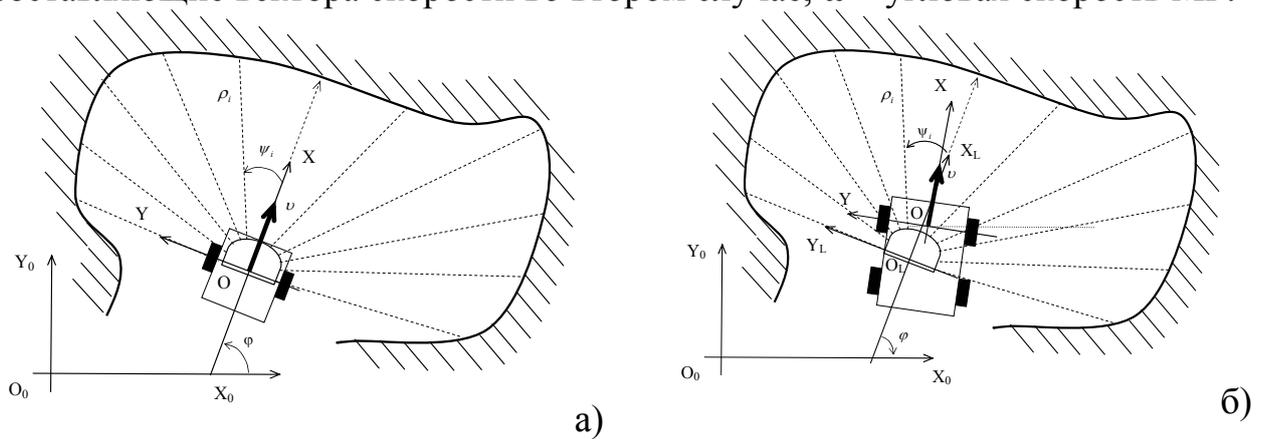


Рис. 3. Две модели движения робота.

Для рассматриваемых моделей движения робота с помощью известных кинематических и геометрических соотношений можно получить уравнение относительного движения неподвижной точки рельефа в координатах дальномера. В первом случае:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y - v \\ \dot{y} = -\omega x \end{cases} \quad (1)$$

во втором случае:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y - v_x \\ \dot{y} = -\omega x - v_y \end{cases} \quad (2)$$

Аналогичные соотношения можно получить относительно переменных  $\rho$  и  $\psi$  в полярных координатах для первого и второго случая:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = -\omega + v \sin \psi \\ \dot{\rho} = -v \cos \psi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{\psi} = -\omega + (v_x \sin \psi - v_y \cos \psi) / \rho \\ \dot{\rho} = -v_y \sin \psi - v_x \cos \psi \end{cases} \quad (4)$$

В процессе движения МР, дальнометрическое изображение совершает некоторую эволюцию в координатах дальномера, которая может быть описана с помощью функций  $f(x, y, t) = 0$  или  $h(\rho, \psi, t) = 0$  в декартовых и полярных координатах соответственно. Эти функции задают некоторую поверхность в трехмерном пространстве  $(x, y, t$  или  $\rho, \psi, t)$ , для каждой точки которой выполняются равенства:

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial t} dt = 0 \quad \text{или} \quad (5)$$

$$dh = \frac{\partial h}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial h}{\partial \psi} d\psi + \frac{\partial h}{\partial t} dt = 0. \quad (6)$$

Используя значения дифференциалов переменных из уравнений (1-4), получаем из (5) и (6) уравнение связи движения робота с изменением сечения рельефа. Для общего случая – второй рассматриваемой модели движения робота это уравнение имеет вид в декартовых координатах:

$$(yf'_x - xf'_y)\omega - f'_x v_x - f'_y v_y + f'_t = 0$$

или в полярных координатах:

$$-h'_\rho \omega + \left( \cos \psi + h'_\psi \frac{\sin \psi}{\rho} \right) v_x + \left( \sin \psi - h'_\psi \frac{\cos \psi}{\rho} \right) v_y + h'_t = 0 \quad (7)$$

Равенство (7) является линейным уравнением относительно неизвестных параметров движения – линейной и угловой скоростей. Оно выполняется для всех точек, измеряемых с помощью лазерного дальномера, в которых существуют частные производные функции  $h$  рельефа, входящие в выражения для коэффициентов уравнения (7).

Эти коэффициенты могут быть определены из дальнометрических данных. Например, если измерения дальномера представить в виде  $\rho_i = P(\psi_i)$ , а в качестве функции  $h(\rho, \psi, t) = 0$  рассмотреть функцию  $h(\rho, \psi, t) = \rho - P(\psi, t) = 0$ , то дискретные аналоги частных производных функции  $h$ :  $\gamma_\rho^i, \gamma_\psi^i, \gamma_t^i$  могут быть определены численно по разностным формулам:

$$\gamma_\rho^i = 1, \quad \gamma_\psi^i = \frac{P(\psi_{i+1}^k) - P(\psi_i^k)}{\Delta \psi}, \quad \gamma_t^i = \frac{P(\psi_i^{k+1}) - P(\psi_i^k)}{\Delta t},$$

где  $k$  – индекс момента времени,  $i$  – номер измерения,  $\Delta \psi$  и  $\Delta t$  дискреты измерений по углу и времени.

После отсева точек, в которых производные не существуют, для каждого момента времени может быть получена избыточная система уравнений вида (7) (более 100 уравнений при 180 измерениях в одном скане). Из этой системы необходимо определить три неизвестных параметра движения. Естественно, что для нахождения трех неизвестных достаточно только трёх уравнений, но в рассматриваемом случае коэффициенты уравнений системы определены численно, с использованием измерений, содержащих ошибки (шум). Поэтому необходимо найти оценку неизвестных параметров  $v_x, v_y, \omega$ , минимизирующую ошибку по всем уравнениям.

Для получения этих оценок в работе использован метод рекуррентной фильтрации Калмана, который позволяет получить не только сами оценки, но и матрицу ковариации ошибок оценок, которая является характеристикой точности определения параметров  $v_x, v_y, \omega$ .

В качестве уравнения системы использовано условие равенства искомых параметров движения для всех рассматриваемых точек скана, а линейное уравнение связи линейной и угловой скоростей МР с характером сечения рельефа (7) использовано как уравнение измерений:

$$\begin{cases} \omega^{i+1} = \omega^i \\ v_x^{i+1} = v_x^i \\ v_y^{i+1} = v_y^i \end{cases},$$

$$z^i = A^i \omega^i + B^i v_x^i + C^i v_y^i + D^i + \xi^i \quad (8)$$

где  $A^i, B^i, C^i, D^i$  – коэффициенты уравнения (7),  $i$  – номер измерения,  $z^i=0$ , а  $\xi^i$  – шум измерений, включающий в себя неточность работы дальномера и ошибки определения коэффициентов. В работе показано, что закон распределения  $\xi^i$  – нормальный и уравнения вида (8) могут быть использованы в качестве уравнения измерений в фильтре Калмана.

Проведена предварительная проверка разработанного метода в среде *MatLab*. Промоделировано движение робота, оснащенного лазерным дальномером, и получены оценки скоростей модели (рис. 4). Эксперименты показали, что оценки скоростей могут быть определены с достаточной точностью.

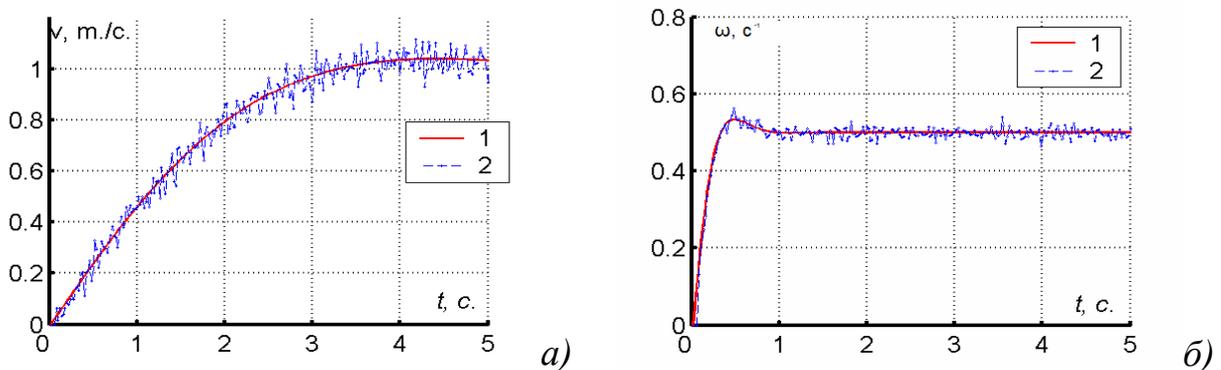


Рис. 4. Линейная скорость (а) и угловая скорость (б) МР, заданные (1) и определенные с помощью предложенного алгоритма (2).

Разработанный метод определения скоростей МР позволяет провести аналитические исследования влияния собственного движения в различных типах рельефа на точность получения оценок скоростей. Он позволяет определить вид уравнений (7) в зависимости от движения МР и сечения рельефа, измеряемого дальномером, и сделать определенные выводы. Такие исследования были проведены для некоторых случаев и, в частности, показано, что при движении МР вдоль плоской стены невозможно определить линейную скорость по дальнометрическому изображению, точно так же, как и угловую скорость в цилиндрическом рельефе.

После того как определены скорости движения МР в каждый момент времени, может быть решена задача локализации путем интегрирования уравнений движения (рис. 5).

В результате того, что на каждом шаге скорости МР определены с ошибкой, имеет место накапливающаяся неточность в определении координат.

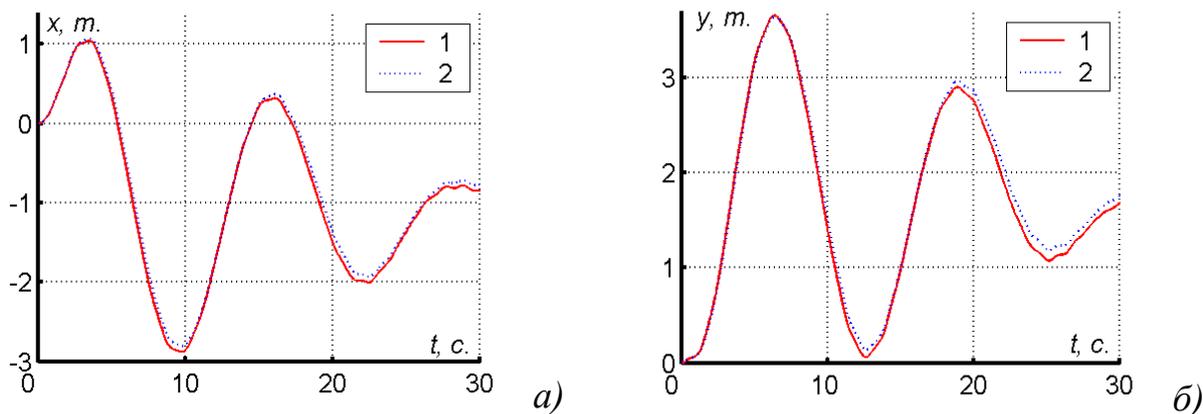


Рис. 5. Координаты движения робота, заданные при моделировании (1) и восстановленные с помощью интегрирования (2).  $x(t)$  (а) и  $y(t)$  (б).

Для определения ошибки интегрирования предложено использовать расширенный фильтр Калмана. В этом случае в качестве уравнений системы использованы нелинейные уравнения движения МР, в следующей форме:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + (v_{xk-1} \cos \varphi_{k-1} - v_{yk-1} \sin \varphi_{k-1}) \Delta t \\ y_k = y_{k-1} + (v_{xk-1} \sin \varphi_{k-1} + v_{yk-1} \cos \varphi_{k-1}) \Delta t \\ \varphi_k = \varphi_{k-1} + \omega_{k-1} \Delta t \\ v_{xk} = v_{xk-1} + v_{4,k-1} \\ v_{yk} = v_{yk-1} + v_{5,k-1} \\ \omega_k = \omega_{k-1} + v_{6,k-1} \end{cases} \quad \text{или } \mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}), \quad (9)$$

где  $v_{4,j}$ ,  $v_{5,j}$ ,  $v_{6,j}$  – искусственно введенные случайные последовательности, позволяющие меняться вектору состояния системы. Значения параметров этих последовательностей – элементов матрицы ковариации возмущений  $V$  – должны быть выбраны такими, чтобы они могли описать изменения параметров движения МР, вызванные работой приводов.

В качестве вектора измерений  $z_k$  использованы определенные с помощью предложенного ранее метода параметры движения робота  $v_x, v_y, \omega$ :

$$z_k = Hx_k + \eta_k,$$

где  $\eta_k$  – случайный вектор шумов в измерениях с параметрами, определяемыми матрицей ковариации  $R$  ошибок оценок  $v_x, v_y, \omega$ , полученной ранее,  $H$  – матрица измерений:

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В расширенном фильтре Калмана в качестве матрицы системы используется матрица Якоби системы (9), вычисленная вдоль оцениваемой траектории  $\hat{x}$ :

$$\Phi_k = \left. \frac{\partial f_k}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}_k = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}$$

Фильтр Калмана описывается следующими уравнениями.

Предсказание оценки вектора состояния  $\hat{\mathbf{x}}$  и матрицы ковариации ошибок оценок  $\mathbf{P}$ :

$$\hat{\mathbf{x}}_k(-) = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}(+))$$

$$\mathbf{P}_k(-) = \Phi_k \mathbf{P}_{k-1}(+) \Phi_k^T + \mathbf{V}_k$$

Обновление оценок по измерениям:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k(-) \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k(-) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k(+) = \hat{\mathbf{x}}_k(-) + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k(-))$$

$$\mathbf{P}_k(+) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k(-) \quad (10)$$

Такой фильтр Калмана позволяет получить не только оценки координат положения МР путем интегрирования оценок скоростей, но и оценку ошибок, накапливаемых в результате интегрирования, с помощью матрицы ковариации ошибок оценок  $\mathbf{P}$  (10).

Увеличение точности оценок параметров движения МР и решения задачи локализации возможно с помощью анализа данных от нескольких датчиков, установленных на роботе. В рамках работы разработаны методы комплексирования данных дальномера с информацией от гироскопа и датчика спутниковой навигационной системы (СНС).

Предложенный метод комплексирования дальнометрической информации и измерений гироскопа основан на рекуррентном фильтре Калмана, в котором для каждого момента времени к оценкам вида (8), полученным по данным дальномера, добавлены уравнения измерения угловой скорости гироскопа:

$$\mathbf{z}^{k+1} = \omega^{k+1} + \xi^{k+1},$$

где  $k$  – количество учитываемых измерений вида (8),  $\xi^{k+1}$  – шум в измерениях гироскопа с дисперсией  $r$ .

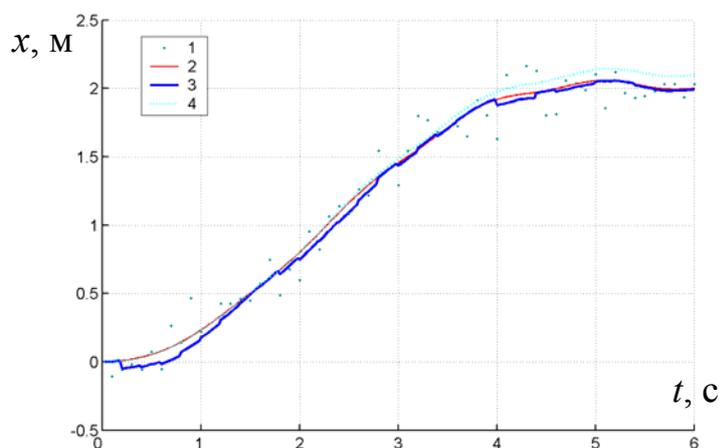
Фильтр Калмана позволяет учесть влияние соотношения точности дальномера и гироскопа на точность полученных оценок (рис. 6).

Метод комплексирования данных дальномера с информацией СНС основан на фильтре Калмана, учитывающем изменение оценок скоростей во времени (9-10). Измерения СНС имеют достаточно большую по отношению к размеру МР ошибку (5-10 м.) и невысокую частоту получения данных (5-10 Гц). В моменты отсутствия сигнала СНС, уравнения фильтра (9-10) остаются без изменения. В те моменты, когда информация о положении робота от СНС доступна, изменяется матрица измерений  $\mathbf{H}$ , так как в этом случае кроме оценок скоростей, полученных по данным лазерного дальномера, добавляются оценки координат  $x$  у МР:

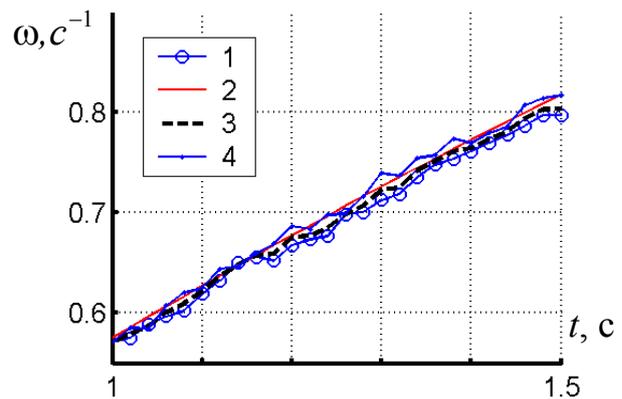
$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \boldsymbol{\eta}_k$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Проведено моделирование работы этого метода в среде *MatLab*. В качестве информации СНС были использованы данные о положении численной модели МР с добавлением случайной составляющей с заданными статистическими характеристиками. Точность работы такой модели датчика СНС составляла 0.1 м, а частота работы 10 Гц (при частоте работы лазерного дальномера 50 Гц). Эксперименты показали, что комплексирование данных дальномера с информацией СНС предложенным способом позволяет компенсировать накопление ошибки по сравнению с методом определения оценок координат по данным дальномера и при этом уменьшить ошибку по сравнению с информацией СНС о положении МР (рис. 7).



*Рис. 7. Определение координаты  $x$  положения МР путем комплексирования данных СНС и лазерного дальномера. Графики: 1 – данные, полученные от СНС, 2 – реальная координата модели МР, 3 – координата, полученная в результате комплексирования, 4 – координата положения, определенная при обработке только данных дальномера.*



*Рис. 6. Определение оценок угловой скорости. 1 – оценка, определенная по данным дальномера; 2 – скорость, заданная в моделировании; 3 – оценка, полученная в результате комплексирования информации дальномера и гироскопа; 4 – оценка, определенная с помощью гироскопа.*

В работе показано, как решение задачи локализации МР с помощью предложенного метода обработки данных лазерного дальномера может быть использовано для построения плана местности, в которой работает робот, за

счет преобразования всех точек сечения рельефа измеренных дальномером в разные моменты времени в общую систему координат. На рис. 8 представлена карта, полученная при моделировании работы алгоритма локализации МР по данным дальномера в среде *MatLab*.

Предложенный метод определения положения МР по данным дальномера, как и другие методы локальной навигации, имеет недостаток – накапливающуюся ошибку. Для решения задачи глобальной навигации использован известный фильтр частиц (*particle filter*). В этом методе рассматривается несколько гипотез о положении робота, с каждой из которых связана своя сетчатая карта, построенная по дальнометрическим данным. Каждая гипотеза имеет свой вес и может быть представлена в виде точки-частицы на карте. Совокупность частиц формирует плотность распределения вероятности положения робота. Алгоритм заключается в выполнении последовательности шагов генерации новых частиц по решению задачи локальной навигации и отсева (фильтрации) частиц за счет сравнения новых дальнометрических измерения с картой каждой частицы.

Обычно для предсказания новых гипотез используются оценки положения робота, полученные с помощью решения задачи локальной навигации. Так как существующие методы локальной навигации не имеют оценок качества полученного решения, то для генерации распределения новых гипотез используется статистическая информация, накопленная из опытных данных для каждого метода.

Предложенный в работе метод локализации МР позволяет получить эти оценки в виде матрицы ковариации (10) непосредственно при обработке дальнометрических данных. Предложен метод использования этой матрицы на шаге генерации гипотез: матрица ковариации ошибок оценок может быть использована для вычисления весов новых гипотез, которые будут зависеть от движения робота и характера рельефа (рис. 9):

$$p_f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} |\mathbf{P}_x|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}_x^{-1}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})\right),$$

где  $\mathbf{P}_x$  – часть матрицы (10), отвечающая за ковариацию ошибок оценок

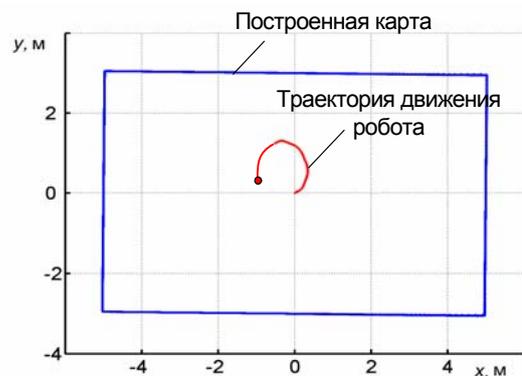


Рис. 8. Полученный план сечения рельефа и траектория движения робота.

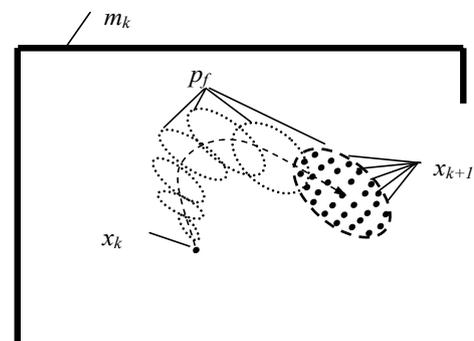


Рис. 9. Генерация гипотез

координат положения робота.

Рассмотрение нескольких вероятных гипотез о положении робота позволяет решать глобальную задачу навигации и проблему замыкания циклов.

**В третьей главе** представлены разработанные методы управления МР, оснащённым лазерным дальномером.

В качестве модели МР рассматривается модель робота с двумя ведущими колесами.

Рассмотрены две группы методов управления МР: управление по данным дальномера и управление по построенной карте.

Первая группа алгоритмов управления предназначена для управления робота по ориентирам, которые можно выделить в дальнометрическом изображении. В работе предложены алгоритмы управления МР, целью которых является движение МР вдоль стены на заданном расстоянии.

Одним из предложенных вариантов является движение на виртуальный маяк, положение которого рассчитывается для каждого момента

времени в зависимости от текущего дальнометрического изображения.

Виртуальный маяк помещается на прямую, параллельную хорде сечения рельефа, которая проведена через ближайшую к МР точку (рис. 10) и самую далёкую от него точку стены. Параметры прямой и направление на виртуальный маяк могут быть определены по дальнометрическому изображению. Известные геометрические соотношения позволяют установить значение угла  $\psi$  между направлением на маяк и текущим направлением МР. Полученный угол может быть использован в качестве ошибки управления:  $\omega = k\psi$ .

Помимо движения на виртуальный маяк предложен алгоритм движения вдоль стены с помощью виртуального щупа. В этом случае выбирается луч дальнометрического изображения, служащий виртуальным щупом, например, в этом качестве может быть использован луч с углом отклонений от оси робота ( $-45^\circ$ ) для движения вдоль правой стены (рис. 11). Ошибкой управления будет разность между текущей длиной щупа  $\rho_{-45}$  и его опорной длиной  $\rho$ :  $\omega = k(\rho_{-45} - \rho)$ .

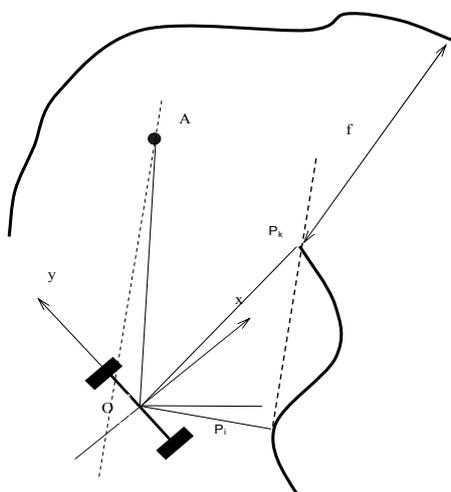


Рис. 10. Улучшенный алгоритм движения вдоль стены.

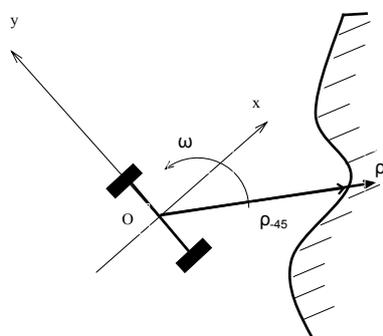


Рис. 11. Движение вдоль стены с помощью виртуального щупа.

Предложенные алгоритмы управления недостаточно гибки и требуют дополнительного анализа дальнометрического изображения для предотвращения столкновения с препятствиями на пути МР.

Вторая группа алгоритмов управления МР использует сетчатую карту и информацию о текущем положении робота, полученные при решении задачи навигации по дальнометрическим данным. Задача управления может в этом случае формулироваться в виде целевой точки на карте.

Планирование пути в целевую точку по сетчатой карте может быть осуществлено с помощью нескольких известных алгоритмов (волновой алгоритм, алгоритм Дейкстры, алгоритм А\* и др.) в работе предложена модификация алгоритма планирования пути в точку, позволяющая найти путь, проходящий удаленно от препятствий в рабочей зоне МР. Первоначальное планирование пути происходит с помощью любого из известных алгоритмов, например, волнового с учетом размера МР (рис. 12а).

Затем точки пути перемещаются в соответствии с картой штрафов (рис. 12б), в которой величина штрафа уменьшается пропорционально расстоянию до препятствия, в зоны с меньшей величиной штрафа. Полученный маршрут разбивается опорными точками на участки, длиной, не превышающей дальность работы дальномера (рис. 12в).

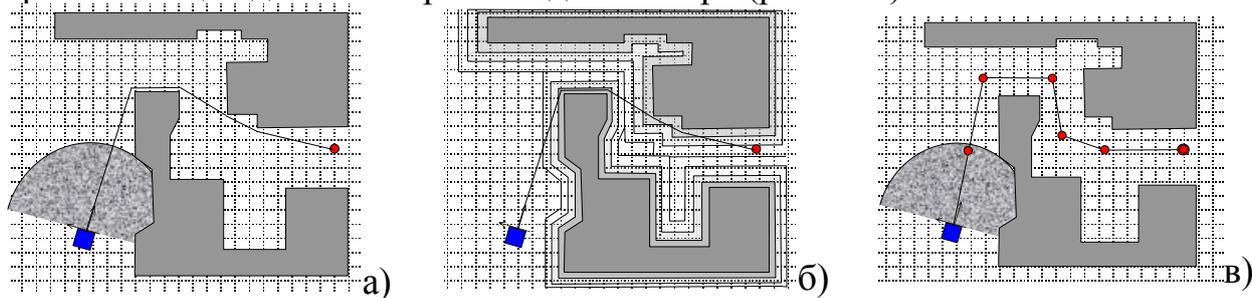


Рис. 13. Модификация алгоритма планирования пути в точку.

Опорные точки используются как промежуточные целевые точки, достигая которые последовательно, МР движется к конечной цели. Условие близости опорных точек позволяет использовать для управления движением МР в опорную точку лишь фрагмент карты – текущий скан, что позволяет осуществлять процесс планирования пути в режиме реального времени.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов навигации и управления МР на реальном объекте.

В рамках НИР, проходившей в НУЦ «Робототехника», создан макет автономного МР на базе шасси «Вездеход ТМЗ» (рис. 14).

Робот оборудован лазерным сканирующим дальномером фирмы *SICK LMS200* с диапазоном измерения дальностей по расстоянию 80 метров, по углу 180°, точностью измерения расстояний 15 мм, дискретностью по углу 1°. Система управления построена на базе вычислительной машины (ВМ) в формате *PC104+* с процессором *Celeron 600 MHz*. Робот оборудован дополнительными датчиками и видеокамерами для удобства работы

оператора. Связь между бортовой ВМ и пультом оператора осуществляется через беспроводную сеть *WiFi*. Структура аппаратных средств приведена на рис. 15.

Система управления МР построена на базе ОС *Linux/Debian*. Она организована как распределенная система, в которой каждый модуль является процессом, отвечающим за выполнение определенных функций – методов навигации и управления, разработанных в диссертационной работе (рис. 16). Обмен данными и командами осуществляется через разработанную библиотеку очередей сообщений, передающихся через сетевые сокеты *TCP/IP*.

Модульная архитектура позволяет распределять нагрузку между пультовой и бортовой машиной, перенося часть модулей с одной на другую, а также выполнять отладку алгоритмов и приложений не на реальном роботе, а в среде *Player/Stage* – пакете свободно распространяемого программного обеспечения для моделирования МР, созданного в университетах США (Стэнфорд, Карнеги). Пакет моделирует кинематику и динамику МР в заданной среде и работу многих датчиков, в том числе лазерного дальномера.

Программное обеспечение, созданное в рамках работы, позволяет решать задачу навигации: определять текущее положение МР относительно начального, строить план местности, выполнять



Рис.14. Внешний вид мобильного робота

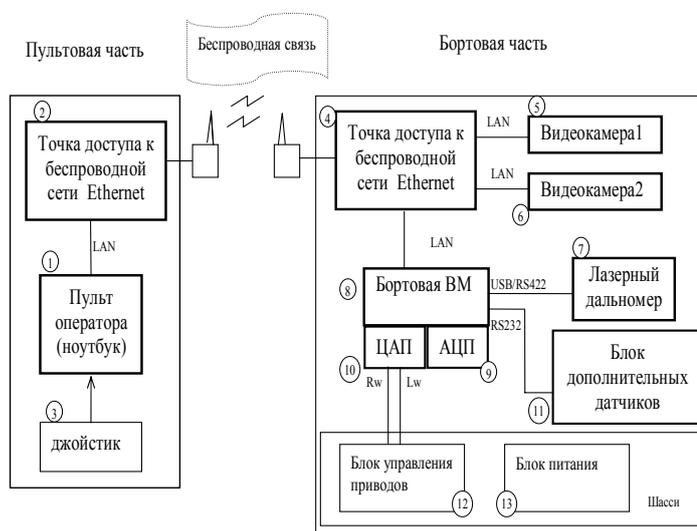


Рис. 15. Структура аппаратных средств.

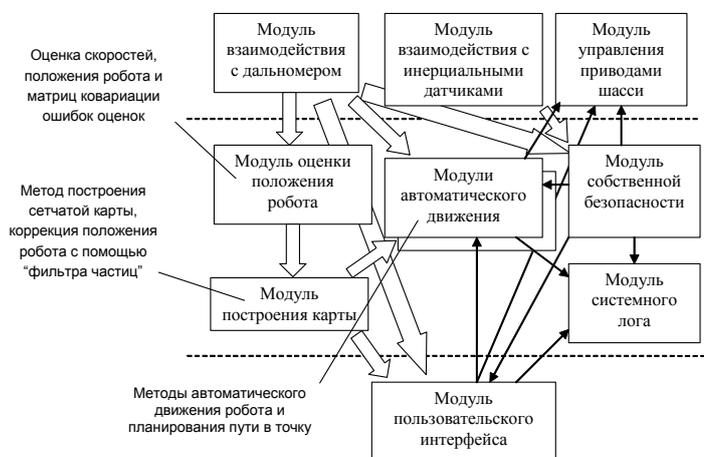


Рис. 16. Структура программных средств.

автоматическое движение в различных режимах (вдоль заданной стены, в указанную оператором точку, в дистанционном). На рис. 17 приведена карта, полученная при работе системы управления с моделью МР в пакете *Player/Stage*.

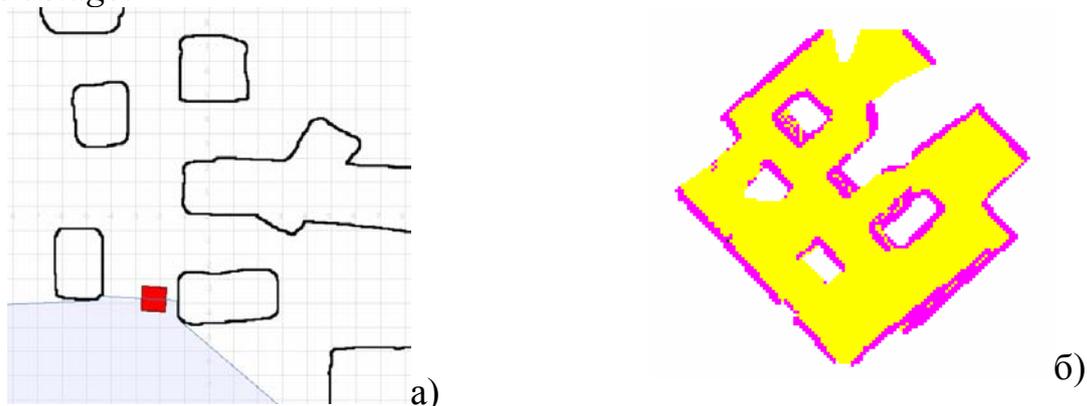


Рис. 17. План, использовавшийся при моделировании (а), и карта, построенная с помощью разработанного в работе алгоритма.



Рис. 18. Карта, построенная в ходе экспериментов на реальной работе.

На рис. 18 представлен план, построенный при работе МР в помещении научно-учебного центра «Робототехника» МГТУ им. Баумана. Ошибка локализации МР, накопленная за 10 мин. работы, при этом составляет порядка 0.5 м. по линейным координатам и 0.1 рад. по углу.

Использование фильтра частиц позволяет значительно уменьшить эту ошибку и получить гораздо более точные карты (рис. 19). Ошибка локализации для случая на рис. 19(в) не превышает 0.1 м. и 0.04 рад. соответственно.

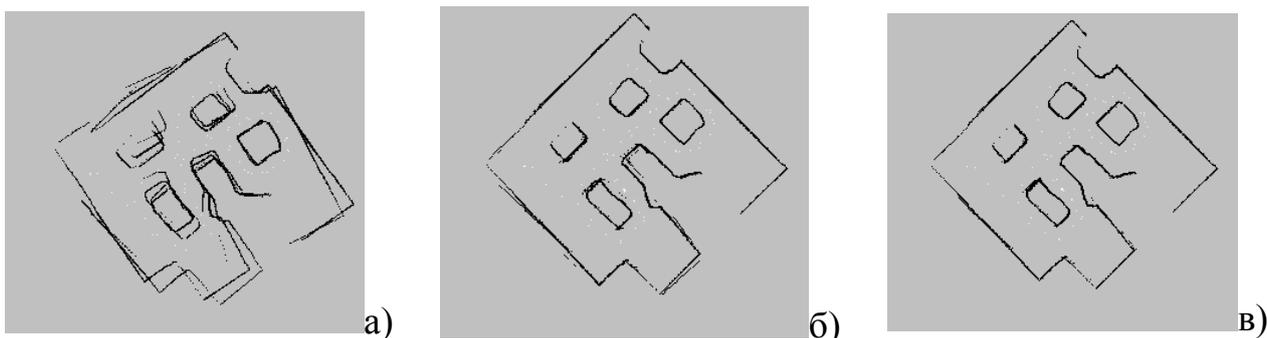


Рис. 19. План местности, полученный с использованием фильтра частиц: количество гипотез в фильтре – 1(а), 20(б), 30(в)

Планирование пути в указанную оператором точку осуществлялось с помощью модифицированного в работе алгоритма, обеспечивающего безопасность движения. На рис. 20 представлены карта штрафов и проложенный с её помощью безопасный путь в заданную точку. Точность выхода МР в заданную точку определяется точностью метода локализации.

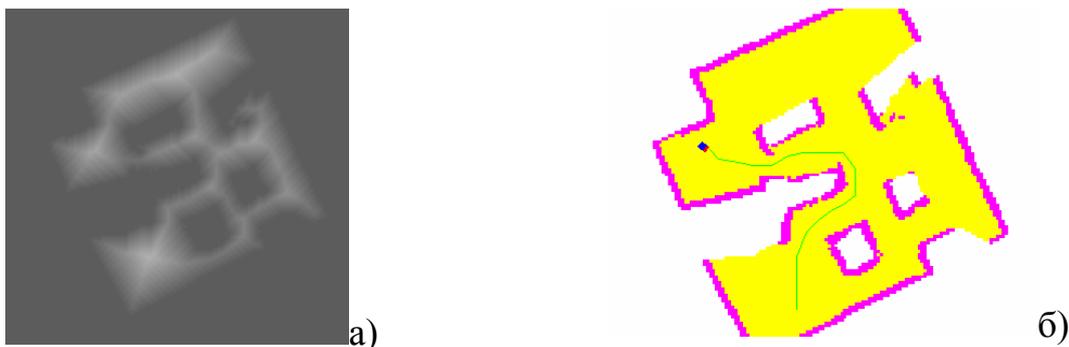


Рис. 20. Планирование маршрута в точку (б) по карте штрифов (а).

Таким образом, результаты, полученные в экспериментах, подтвердили работоспособность и эффективность разработанных методов навигации и управления МР.

#### **Основные результаты и выводы.**

- Разработан метод определения оценок линейной и угловой скоростей МР по дальнометрическому изображению. Решена задача локальной навигации МР с помощью полученных оценок.
- Разработаны методы комплексирования данных лазерного дальномера с информацией датчика угловой скорости (гироскопа) и датчика положения (СНС), позволяющие улучшить точность решения задачи навигации МР.
- Предложен метод использования матрицы ковариации ошибок оценок координат положения в фильтре частиц для решения задачи глобальной навигации. Метод позволяет учесть движение МР и характер изменения сечения рельефа.
- Модифицирован метод планирования пути по построенному плану местности, обеспечивающий безопасное движение МР в среде с препятствиями.
- Проведены экспериментальные исследования на компьютерной модели и на макете реального МР. Эксперименты подтвердили работоспособность предложенных методов навигации и управления МР.

#### **Публикации.**

1. Зенкевич С.Л. Минин А.А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальнометром, методом рекуррентной фильтрации //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – №8. – С.5-12.

2. Зенкевич С.Л. Минин А.А. Построение плоской карты мобильным роботом //Мобильные роботы и мехатронные системы: Труды Всероссийской научной школы-конференции. – М., 2006. – С.161-173.

3. Минин А.А. Определение параметров собственного движения мобильного робота, оснащенного лазерным дальнометром //Экстремальная робототехника: Труды Всероссийской научно-технической конференции. – СПб., 2007. – С.205-213.