

На правах рукописи

Све Лин Хту Аунг

**НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО
РОБОТА В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ**

Специальность 05.02.05.
Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Развитие мобильной робототехники направлено на создание автономного средства, позволяющего заменить человека в тяжелой, опасной и ответственной работе. С другой стороны, в настоящее время в большинстве случаев человек оказывается причиной дорожно-транспортного происшествия. Поэтому современные автомобили нуждаются в использовании широкого ряда электронных технологий, призванных помогать водителю. Они известны как технологии автономного вождения и служат для того, чтобы свести к минимуму влияние человеческого фактора - ошибок, которые могут привести к дорожно-транспортному происшествию.

Таким образом, исследованием научных проблем управления автономными мобильными роботами и поиском новых конструкторских и алгоритмических решений занимается множество лабораторий по всему миру. Также работы ведутся, в том числе, в МГТУ им. Н.Э.Баумана, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, ИПМех РАН, МИРЭА, МГТУ «Станкин». Кроме того, в мире проводятся различные соревнования мобильных роботов, имеющие целью не только поиск новых решений, но и подготовку специалистов - робототехников. Самым заметным соревнованием можно считать гонки автономных роботов-автомобилей в городских условиях в 2007 году под названием DARPA Urban Challenge. В июле 2010 года состоялись первые в России соревнования мобильных роботов, движущихся по трассе, проложенной по пересеченной местности (берег озера Селигер).

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является решение задачи навигации мобильного робота (МР) в городских условиях по данным сканирующего лазерного дальномера, а также разработка методов управления движением МР по городу с использованием дальнометрических данных.

Для достижения заданной цели в работе поставлены и решены следующие задачи.

- Анализ существующих методов решения задач навигации.
- Разработка метода определения линейной и угловой скоростей (6 параметров движения) МР по данным 3D лазерного дальномера и их использование для локализации робота и построения 2D карты местности.
- Управление движением МР по построенной в процессе движения карты с учётом статических препятствий.
- Проведение параметрического синтеза созданных алгоритмов управления движением.
- Проведение экспериментальных исследований на компьютерной модели.

Методы исследования. В работе использованы классические подходы к решению задач кинематики и динамики движения твердого тела, методы рекуррентной фильтрации, а также методы теории автоматического управления и регулирования для параметрического синтеза алгоритмов управления движением МР. Достоверность полученных результатов подтверждается численными экспериментами.

На защиту выносятся

1. Способ определения параметров движения МР по данным 3D лазерного дальномера и решение задачи локализации МР.
2. Метод определения точностных статистических характеристик решения навигационной задачи.
3. Методы управления движением МР вдоль тротуара и на перекрестке в городских условиях по данным 3D лазерного дальномера.

Научная новизна результатов исследования

Разработан метод построения трехмерной карты на основе данных, полученных 3D дальномером. В отличие от существующих методов, использующих, как правило, итерационные процедуры поиска экстремума функции близости в 6-мерном пространстве параметров движения, разработанный метод основан на решении линейной системы уравнений и позволяет получать точностные характеристики параметров движения. Кроме того, разработанный метод позволяет аналитически исследовать зависимость дальнометрического изображения от движения МР и характера рельефа, и получать множество двумерных карт, как плоских сечений 3D карты, которые могут быть использованы при управлении движением МР.

Разработан способ управления движением мобильного робота вдоль тротуара и на перекрестке в городских условиях.

Практическая ценность работы. Результаты исследований могут быть использованы при создании систем управления МР, оснащенных 3D лазерным дальномером, предназначенных для работы в сложной недетерминированной среде с гладкой поверхностью движения.

Достоверность полученных результатов определяется проверкой разработанного алгоритма навигации и управления движением МР в городских условиях в известных, хорошо зарекомендовавших себя, программных пакетах MATLAB и Microsoft Robotic Developer Studio.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференции «Экстремальная робототехника нано-, микро- и макророботы» (Россия, Дивноморское, 28 сентября-3 октября 2009 года), 21-ой научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 12-14 октября 2010 года).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 5 публикациях, из них в журналах по перечню ВАК-2.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов по каждой главе, заключения и списка литературы. Работа изложена на 200 листах машинописного текста и содержит 75 рисунков, 5 таблицы, список литературы из 62 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении дан обзор и анализ работ, относящихся к теме диссертации, и рассмотрены вопросы, связанные с актуальностью темы, целью работы, методикой исследований, достоверностью результатов, научной новизной диссертации, теоретической и практической ценностью работы. Охарактеризованы структура и объем диссертации.

В первой главе представлены известные методы решения проблемы навигации по данным, поступающим от лазерного дальномера.

Рассмотрена задача навигации мобильного робота, движущегося в недетерминированной среде, с использованием лазерного дальномера, установленного на роботе для измерения дальностей до окружающих объектов. Задача навигации состоит из подзадач определения положения робота – локализации, и составления описания окружающей среды – картографии.

В настоящее время навигация автономных МР осуществляется по трем основным схемам: глобальная, локальная и персональная. В главе приведены существующие решения проблемы глобальной навигации, основанные на использовании вероятностных методов и их разновидность – так называемый фильтр частиц (particle filter). Эти методы используют несколько гипотез о положении робота и, при возможности, компенсируют накапливающуюся ошибку. Рассмотренные методы глобальной навигации используют алгоритмы локальной навигации для получения новых гипотез.

Также рассмотрены известные методы решения задачи локальной навигации и их основные недостатки. В их числе - 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 требует анализа сцены и сложных вычислений. Кроме того, основной недостаток существующих методов локальной навигации – отсутствие оценки точности полученного решения – может приводить к потерям производительности и точности методов глобальной навигации.

Во второй главе предлагается новый подход к решению задачи локальной навигации – определение положения робота за счет вычисления линейных и угловых скоростей МР по изменению дальнометрического изображения.

Для решения этой задачи была рассмотрена математическая модель мобильного робота - двухколесный робот,двигающийся без проскальзывания.

Система координат лазерного дальномера совпадает со связанной системой координат робота (рис.1). Кинематические уравнения движения МР, как свободного твёрдого тела в абсолютных координатах, имеют следующий вид:

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{x}_0 = v_{x_0} \\ \dot{y}_0 = v_{y_0} \\ \dot{z}_0 = v_{z_0} \\ \dot{\theta} = \omega_x \cos \varphi - \omega_y \sin \varphi \\ \dot{\psi} = \frac{1}{\sin \theta} (\omega_x \sin \varphi + \omega_y \cos \varphi) \\ \dot{\phi} = \omega_z - \dot{\psi} \cos \theta \end{cases}$$

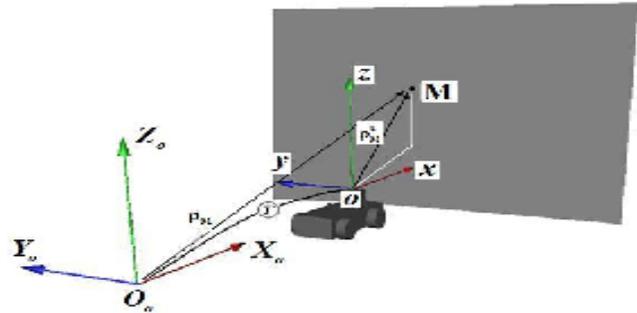


Рис.1. Модель мобильного робота

где x_0, y_0, z_0 – декартовы координаты начала связанной системы координат $OXYZ$ в абсолютной системе $O_0X_0Y_0Z_0$, θ, ψ, ϕ – углы Эйлера, задающие ориентацию $OXYZ$ в $O_0X_0Y_0Z_0$, $v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0}$ – линейные скорости начала системы координат O в абсолютной системе координат, а $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости робота, спроектированные в связанную систему координат.

Для рассматриваемой модели движения робота с помощью известных кинематических и геометрических соотношений можно получить уравнения относительного движения неподвижной точки рельефа M в координатах дальномера:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \omega_z y - \omega_y z - v_x, \\ \dot{y} &= -\omega_z x + \omega_x z - v_y, \\ \dot{z} &= \omega_y x - \omega_x y - v_z. \end{aligned} \quad (2)$$

где v_x, v_y, v_z – скорость в связанной системе координат, x, y, z – координаты неподвижной точки рельефа в связанной с роботом системе координат.

В процессе движения МР, дальнометрическое изображение совершает некоторую эволюцию в координатах дальномера, которая может быть описана с помощью функций $f(x, y, z, t) = 0$. Для этих поверхностей верно равенство нулю полного дифференциала функций:

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial t} dt = 0 \quad (3)$$

Используя значения дифференциалов переменных из уравнений (2), получаем из (3) уравнение связи движения робота с изменением сечения рельефа:

$$\omega^T (r \times f_r) + v^T f_r - f_t = 0 \quad (4)$$

Уравнение (4) также может быть записано в виде:

$$A\omega_x + B\omega_y + C\omega_z + Dv_x + Ev_y + Fv_z + G = 0 \quad (5)$$

где $A = zf'_y - yf'_z$, $B = xf'_z - zf'_x$, $C = yf'_x - xf'_y$,
 $D = -f'_x$, $E = -f'_y$, $F = -f'_z$, $G = f'_t$

Результатом измерения дальномера является массив расстояний до ближайших точек объектов в пространстве, что представляет собой сечение окружающего пространства, которое называется дальнометрическим изображением или сканом. В каждый момент времени t , декартовы координаты (x, y, z) точек, принадлежащих видимой части рельефа известны. Это позволяет вычислить r, f_r, f_t , и тогда соотношение (4) и его аналог (5) можно рассматривать, как бесконечную систему линейных уравнений относительно мгновенных значений параметров движения: вектора угловой $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ и линейной $v = (v_x, v_y, v_z)^T$ скорости. Это означает, что, вычисляя параметры A, B, C, D, E, F по известным данным дальномера и решая систему уравнений (5), можно восстановить параметры движения робота ω и v .

Дискретизация измерений приводит к тому, что функция $f(x, y, z, t)$, описывающая эволюцию рельефа, превращается в решетчатую функцию:

$$f(x_s^{j,i}, y_s^{j,i}, z_s^{j,i}, t_s) = 0 \quad (6)$$

где $s = 0, 1, 2, \dots$ - номер скана, $j = 0, 1, 2, \dots, J-1$, $i = 0, 1, 2, \dots, I-1$ - индексы измерения внутри s -ого скана.

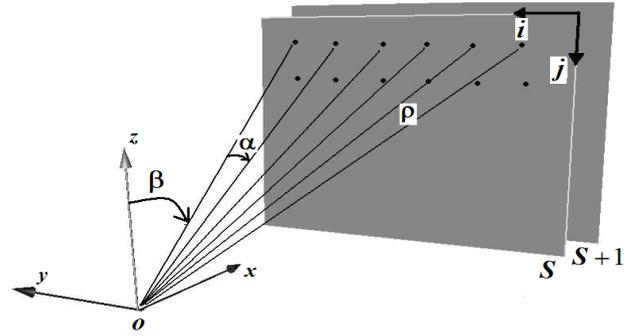


Рис.2. Сканы s и $s+1$, получаемые от лазерного дальномера

Все измеренные точки принадлежат поверхности (6) и, следовательно, удовлетворяют дискретному аналогу соотношения (5):

$$A^p \omega_x^p + B^p \omega_y^p + C^p \omega_z^p + D^p v_x^p + E^p v_y^p + F^p v_z^p + G^p = 0 \quad (7)$$

где $p = 0, 1, 2, \dots, I \times J - 1$ - числа точек на скане.

Лазерный дальномер измеряет сечения рельефа в сферических координатах (рис.2): каждое измерение расстояния $\rho^p = \rho(\alpha^i, \beta^j)$ зависит от углов отклонения луча, поэтому полученные коэффициенты линейного уравнения, связывающего параметры движения в виде (7), необходимо преобразовать из сферических координат в декартовы:

$$x = \rho \sin \beta \cos \alpha, \quad y = \rho \sin \beta \sin \alpha, \quad z = \rho \cos \beta$$

$$f'_d = f'_s (\Phi'_s)^{-1}$$

где $f'_s(\alpha, \beta, \rho, t) = (f'^{s'}_{\alpha}, f'^{s'}_{\beta}, f'^{s'}_{\rho}, f'^{s'}_t)$, $f'_d(x, y, z, t) = (f'^{d'}_x, f'^{d'}_y, f'^{d'}_z, f'^{d'}_t)$

$$\Phi'_s = \begin{pmatrix} -\rho \sin \beta \sin \alpha & \rho \cos \beta \cos \alpha & \sin \beta \cos \alpha & 0 \\ \rho \sin \beta \cos \alpha & \rho \cos \beta \sin \alpha & \sin \beta \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\rho \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Таким образом, для каждой точки скана можно вычислить значения частных производных функции f (за исключением тех точек, в которых они не существуют, т.е. их значение превышает некоторый порог):

$$f'_\alpha = \frac{\rho(s, j, i+1) - \rho(s, j, i)}{d\alpha}, \quad f'_\beta = \frac{\rho(s, j+1, i) - \rho(s, j, i)}{d\beta},$$

$$f'_\rho = -1, \quad f'_t = \frac{\rho(s+1, j, i) - \rho(s, j, i)}{dt}$$

где $d\alpha, d\beta$ и dt – дискретности измерений по углам и по времени соответственно.

После отсева точек, в которых производные не существуют, для каждого момента времени может быть получена избыточная система уравнений вида (7). В данном случае, число уравнений равняется числу измерений, то есть для дальномера с дискретностью измерений по вектикальному и горизонтальному углу в 1° , составляет более 1000.

Из этой системы необходимо определить шесть неизвестных параметров движения. Естественно, что для их нахождения достаточно только шести уравнений, но, в рассматриваемом случае, коэффициенты уравнений системы определены численно, с использованием измерений, содержащих ошибки (шум). Поэтому необходимо найти оценки неизвестных параметров $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, v_x, v_y, v_z)$, минимизирующие невязку.

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. В качестве уравнения объекта использовано условие равенства искомым параметров движения для всех рассматриваемых точек скана:

$$\begin{cases} \omega_x^{p+1} = \omega_x^p, \omega_y^{p+1} = \omega_y^p, \omega_z^{p+1} = \omega_z^p \\ v_x^{p+1} = v_x^p, v_y^{p+1} = v_y^p, v_z^{p+1} = v_z^p \end{cases}$$

а линейное уравнение связи линейных и угловых скоростей МР с характером сечения рельефа (7) использовано как уравнение измерений:

$$z^p = A^p \omega_x^p + B^p \omega_y^p + C^p \omega_z^p + D^p v_x^p + E^p v_y^p + F^p v_z^p + G^p + \xi^p \quad (8)$$

Коэффициенты $A^p, B^p, C^p, D^p, E^p, F^p, G^p$, входящие в уравнение измерений (8), являются случайными, поскольку они зависят от измерений дальности, содержащих ошибки. Статические характеристики эквивалентного аддитивного шума в измерениях $z^p = \xi^p$ находятся в результате численного эксперимента.

Предварительная проверка разработанного метода проведена в среде MatLab. Промоделировано движение робота, оснащенного 3D лазерным дальномером, в горизонтальной плоскости с постоянной линейной и угловой скоростями, и получены оценки скоростей модели. Графики параметров движения, определенных с помощью разработанного алгоритма, представлены на рисунке (3), совместно с параметрами, заданными при моделировании. Эксперименты показали, что оценки скоростей могут быть определены с 10% точностью.

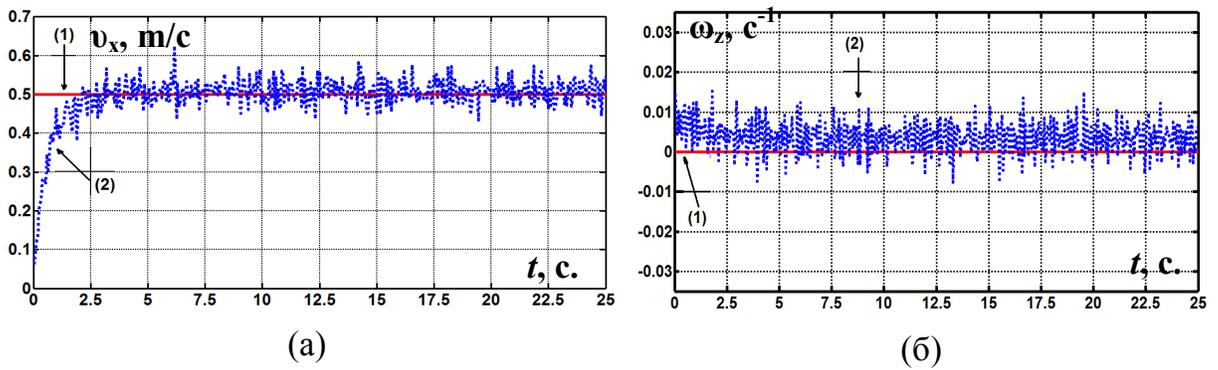


Рис. 3. Линейная скорость (а) и угловая скорость (б) МР, заданные (1) и определенные с помощью предложенного алгоритма (2)

Разработанный метод определения скоростей МР позволяет проводить аналитические исследования влияния собственного движения, в различных типах рельефа, на точность получения оценок скоростей. Он позволяет определить вид уравнений (8), в зависимости от движения МР, и сечения рельефа, измеряемого дальномером, и сделать определенные выводы. Такие исследования были проведены для некоторых случаев.

После того, как получены оценки линейных и угловых скоростей, решается задача локализации мобильного робота - определение оценки координат положения робота, путем интегрирования кинематических уравнений движения с оценками скоростей (рис.4).

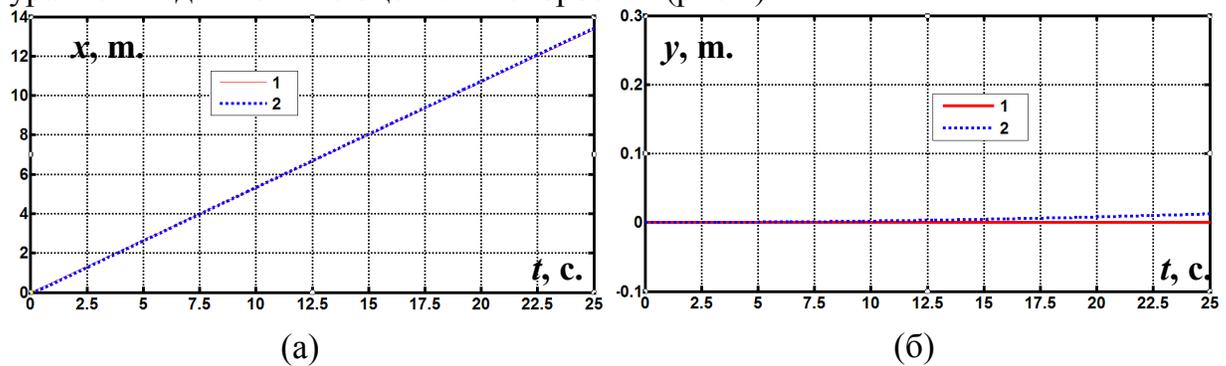


Рис. 4. Координаты движения робота, заданные при моделировании (1) и восстановленные с помощью интегрирования (2). $x(t)$ (а) и $y(t)$ (б)

Решение задачи локализации с помощью простого интегрирования уравнений движения обладает рядом недостатков. Во-первых, происходит накопление ошибки, которая неизбежно возникает при определении параметров движения мобильного робота. Во-вторых, это накопление остается неучтенным, то есть отсутствует информация о том, насколько можно доверять полученным при интегрировании результатам.

Эти проблемы удастся решить с помощью расширенного фильтра Калмана. В этом случае, в качестве уравнений объекта использованы уравнения движения робота (1), дополненные случайными последовательностями, отражающими возможные изменения скоростей робота:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_k = x_{k-1} + (v_{xk-1})\Delta t, \quad y_k = y_{k-1} + (v_{yk-1})\Delta t, \quad z_k = z_{k-1} + (v_{zk-1})\Delta t, \\ \theta_k = \theta_{k-1} + (\omega_{xk-1} \cos \varphi_{k-1} - \omega_{yk-1} \sin \varphi_{k-1})\Delta t, \\ \psi_k = \psi_{k-1} + \left(\frac{1}{\sin \varphi_{k-1}} (\omega_{xk-1} \sin \varphi_{k-1} + \omega_{yk-1} \cos \varphi_{k-1}) \right) \Delta t, \\ \varphi_k = \varphi_{k-1} + (\omega_{zk-1} - \psi_{k-1} \cos \theta_{k-1})\Delta t, \\ \omega_{xk} = \omega_{xk-1} + v_{7k}, \quad \omega_{yk} = \omega_{yk-1} + v_{8k}, \quad \omega_{zk} = \omega_{zk-1} + v_{9k}, \\ v_{xk} = v_{xk-1} + v_{10k}, \quad v_{yk} = v_{yk-1} + v_{11k}, \quad v_{zk} = v_{zk-1} + v_{12k}. \end{array} \right.$$

Оценки скоростей и матрица ковариации ошибок оценок, полученные в результате работы алгоритма определения оценок параметров движения по скану, могут быть использованы как вектор измерений и матрица ковариации шумов соответственно.

Такой подход 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.

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.

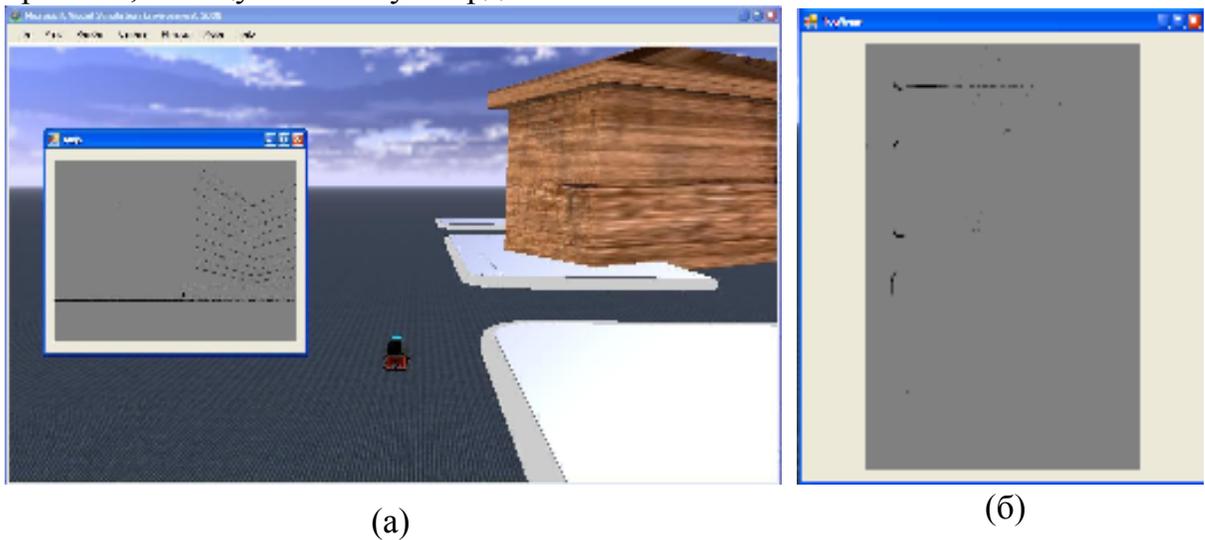


Рис. 5. План, использовавшийся при моделировании и 3D карта, построенная с помощью решения задачи навигации (а). 2D карта, построенная с помощью решения задачи навигации (б)

Следует заметить, что лучшим вариантом для управляющей системы является получение трехмерной карты окружающего мира в качестве входной информации, однако её хранение и обработка бортовой системой робота затруднены: нужны слишком большие вычислительные ресурсы. Предложенный алгоритм дает возможность получения множества двумерных карт как плоских сечений 3D карты, которые могут быть использованы при управлении движением мобильного робота. На рис. 5 представлена карта,

полученная при моделировании работы алгоритма локализации МР по данным 3D дальномера в среде Microsoft Robotic Developer Studio.

В третьей главе рассматривается решение задачи разработки алгоритмов, позволяющих по информации от 3D лазерного сканирующего дальномера осуществлять управление движением МР при перемещении вдоль тротуара и на перекрестке. Проводится математическое моделирование и исследование разработанных алгоритмов.

В качестве модели МР используется динамическая модель робота с двумя ведущими колесами, управляемыми двигателями постоянного тока, и редуктором:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = v \cos \varphi, \\ \dot{y} = v \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{v} = -b\omega^2 - Av + B(U_R + U_L), \\ \dot{\omega} = C\omega v - D\omega + E(U_R - U_L) \end{array} \right. , \quad \begin{array}{l} A = \frac{2\mu}{\rho m}, B = \frac{2\delta}{\rho m}, C = \frac{bm}{i_z}, \\ D = \frac{W^2\mu}{2\rho i_z}, E = \frac{W\delta}{\rho i_z}, \\ \mu = \frac{2i_p^2 k_M k_{TT} k_y}{R_M \rho}, \delta = \frac{2i_p k_M k_y}{R_M} \end{array} \quad (9)$$

где U_R, U_L - напряжение, подаваемые на приводы ведущих колес МР, b - координата центра масс платформы, лежащего на оси симметрии, W - расстояние между центрами ведущих колес, m - масса робота, i_z - момент инерции платформы относительно вертикальной оси, ρ - радиус колеса, $k_M, k_{TT}, k_y, i_p, R_M$ - параметры привода.

При этом напряжения и формируются в виде:

$$\begin{cases} U_R = U_d + U_\varepsilon \\ U_L = U_d - U_\varepsilon \end{cases}$$

где $U_d = \text{const}$ - напряжение, обеспечивающее заданную линейную скорость движения МР, а U_ε зависит от ошибки управления:

$$U_\varepsilon = -k_1 \varphi + k_2 (-y + y^*) \quad (10)$$

где k_1, k_2 - некоторые параметры, φ - угол между продольной осью робота и направлением тротуара, y^* и y - желаемая и текущая координаты тротуара в собственной системе координат.

На первом этапе рассматривается простейший случай, когда абсолютная система координат расположена так, что ось X_0 параллельна тротуару, а сам тротуар представляет из себя последовательность отрезков, лежащих на одной прямой, расположенной на оси X_0 .

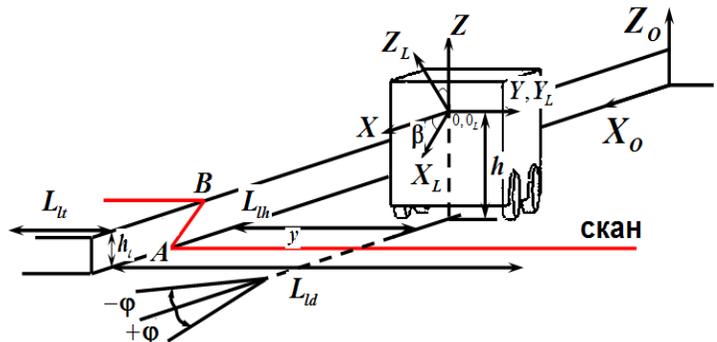


Рис.6. Движение робота вдоль прямолинейного тротуара

В этом случае робот должен двигаться по прямой, расположенной на заданном расстоянии от тротура (рис.6).

Уравнения (9) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений пятого порядка, описывающую движения МР на плоскости. Для выбора коэффициентов k_1, k_2 проведена линеаризация уравнений движения с тем, чтобы можно было использовать классические методы анализа линейных стационарных систем. В качестве программной траектории выбрана $x(t) = v_c t, y(t) = y^*, \varphi(t) = 0, v(t) = v_c, \omega(t) = 0$ т.е. равномерное и прямолинейное движение вдоль тротуара. Тогда уравнения в отклонениях относительно программной траектории, имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = \Delta v, \quad \Delta \dot{y} = v_c \Delta \varphi, \quad \Delta \dot{\varphi} = \Delta \omega, \quad \Delta \dot{v} = -A \Delta v, \\ \Delta \dot{\omega} = -Ek_2 \Delta y - Ek_1 \Delta \varphi - D \Delta \omega \end{cases} \quad (11)$$

Систему (11) можно разбить на две независимые подсистемы: одна - относительно вектора $(\Delta x, \Delta v)^T$, другая - относительно $(\Delta y, \Delta \varphi, \Delta \omega)^T$. Параметры k_1, k_2 входят во вторую подсистему.

Соответствующий характеристический многочлен $f(\lambda)$ имеет вид:

$$f(\lambda) = \lambda^3 + D\lambda^2 + Ek_1\lambda + Ek_2v_c \quad (12)$$

Проанализировать зависимость расположения корней от коэффициентов k_1, k_2 можно, воспользовавшись критерием Гурвица:

$$H = \begin{vmatrix} D & Ek_2v_c & 0 \\ 1 & Ek_1 & 0 \\ 0 & D & Ek_2v_c \end{vmatrix} \quad \begin{cases} \Delta_1 = D > 0 \\ \Delta_2 = DEk_1 - Ek_2v_c > 0 \\ \Delta_3 = Ek_2v_c(\Delta_2) > 0 \end{cases}$$

Последние соотношения приводят к неравенствам:

$$0 < \frac{k_2v_c}{D} < k_1 \quad (13)$$

Известное соотношение для коэффициентов кубического уравнения (12), при выполнении которого все три корня действительны, состоит в следующем:

$$\frac{p^3}{27} + \frac{q^2}{4} \leq 0 \quad (14)$$

где

$$p = -\frac{b^2}{3a^2} + \frac{c}{a}, \quad q = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a},$$

$$a = 1, b = D, c = Ek_1, d = Ek_2v_c$$

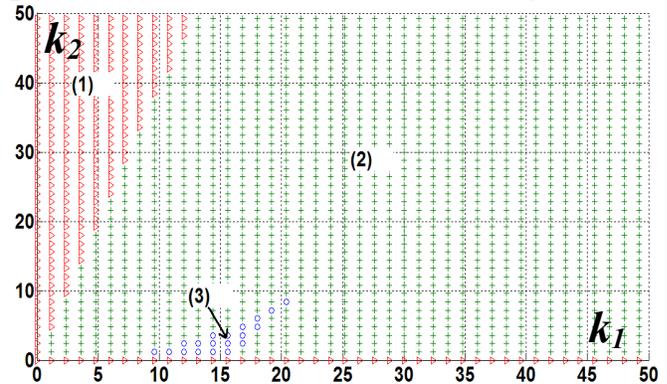


Рис.7. Разбиение плоскости k_1, k_2

Одновременное выполнение условий (13,14) позволяет выделить область параметров k_1, k_2 , обеспечивающих аperiodический переходной процесс. На

рис.7 представлено разбиение плоскости параметров k_1, k_2 . В области 1 система (в приращениях) неустойчива. В области 2 переходный процесс имеет колебательный характер, а в области 3 – аperiodический.

Вычисление угла φ и расстояния y между роботом и тротуаром, входящих в закон управления, выполняется за счёт определения линии пересечения плоскостей дороги L_{ld} , тротуара L_{tt} и парапета L_{th} с каждым сканом дальномера, относительно координат дальномера в процессе движения робота (рис.6).

$$\begin{cases} L_{ld} : \sin \beta X_l - h = 0, \\ L_{tt} : \sin \beta X_l - h + h_t = 0, \\ L_{th} : \sin \varphi \cos \beta X_l + \cos \varphi Y_l + y = 0. \end{cases}$$

Угол наклона отрезка АВ (рис.6), а также координаты его конечных точек позволяют вычислить параметры φ, y , входящие в выражение (9).

$$\varphi = -\frac{1}{\cos \beta} \operatorname{tg} \mu, \quad y = \frac{\cos \varphi (k_b Y_l^A - k_a Y_l^B)}{k_a - k_b}, \quad \text{где } k_a = h * \operatorname{ctg} \beta, \quad k_b = (h - h_t) * \operatorname{ctg} \beta$$

Апробация разработанных алгоритмов управления проводилась путём компьютерного моделирования движения МР с использованием динамической модели, описываемой системой линейных дифференциальных уравнений (11) и нелинейной динамической модели (9) (рис.8). Суть экспериментов состояла в исследовании движения робота с различными значениями коэффициента k_1, k_2 . В начальный момент времени робот неподвижен, находится на расстоянии 1,5 м от тротуара с ориентацией 20° . При выбранных параметрах объекта управления значения критических параметров составляют $k_1 = 15, k_2 = 2$. Для выбранных значений параметров, лежащих в области 3 (рис.7), переходные процессы имеют аperiodический характер, а их вид для нелинейной и линеаризованной модели отличается незначительно.

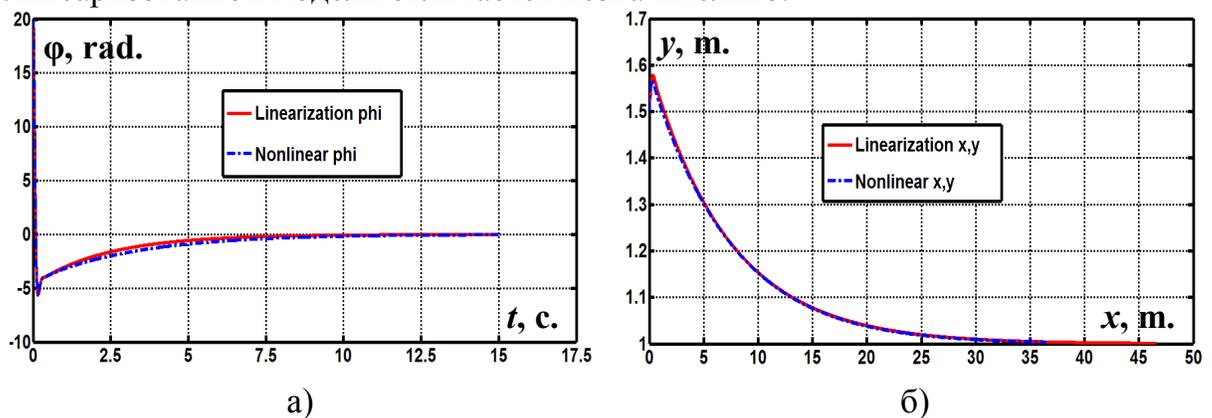


Рис. 8. Изменение $\varphi(t)$ (а), $x(t)$ и $y(t)$ (б) робота при использовании линеаризованной (сплошная кривая) и нелинейной (штриховая) модели

При формировании управления движением робота вдоль произвольного тротуара, робот ориентируется на касательную к тротуару в точке Р (рис.9).

Вычисление угла и расстояния между роботом и тротуаром выполняется за счёт нахождения параметров линии пересечения плоскостей дороги, тротуара и парапета с плоскостью скана дальномера. Соотношения (15) представляют собой уравнения линий пересечения скана с дорогой L_{ld} , тротуаром L_{lt} и парапетом L_{lh} :

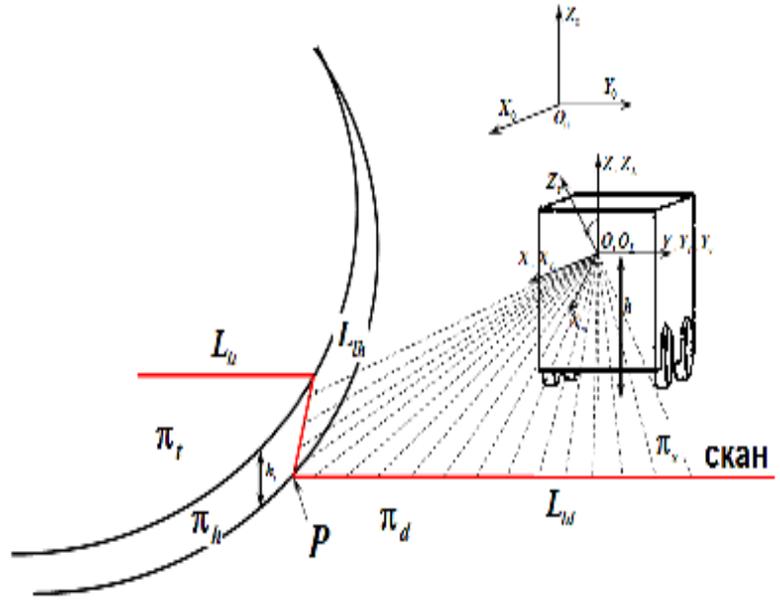


Рис.9. Схема движения мобильного робота вдоль произвольного профиля тротуара

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{ld} : \sin \beta X^s - h = 0; \\ L_{lt} : \sin \beta X^s - h + h_t = 0; \\ L_{lh} : \frac{y_\tau}{x_\tau y_p^s - y_\tau \cos \beta x_p^s} X^s - \frac{x_\tau}{x_\tau y_p^s - y_\tau \cos \beta x_p^s} Y^s + 1 = 0, \end{array} \right. \quad (15)$$

В более общем случае рассматривается управление роботом при движения вдоль разрывного тротуара. В каждый момент времени 3D дальномер передает бортовой системе управления набор сканов, имеющих разные углы в вертикальной плоскости, и, следовательно, в разных точках пересекающие тротуар. Тогда, в случае, когда робот должен миновать разрыв в тротуаре (например, перекресток), необходимо выбрать ближайший скан, которому соответствуют приемлемые значения параметров φ и y .

При исследовании движения мобильного робота в городских условиях, решается задача движения робота на перекрестке. В главе рассматривается алгоритм управления движением МР при повороте налево на перекрестке.

Задача состоит в том, чтобы робот, поворачивая налево, достиг целевой точки параллельно тротуару, и эта целевая точка С находилась бы между двумя тротуарами проезжей части (рис.10). Данная целевая точка может быть назначена оператором. Свойства программной траектории состоят в следующем: (1) Программная траектория (ПТ)- дуга окружности. (2) ПТ проходит через начало связанной системы координат и целевую точку. (3) ПТ параллельна тротуару в целевой точке. (4) ПТ пересчитывается в процессе движения.

Для построения программной траектории, сначала строится прямая L, проходящая через целевую точку, перпендикулярно тротуару (рис.10).

Пусть r_0, r_A, r_B – радиус-векторы, проведенные из точки O' в точки O (центр окружности), A и B – выбранные на линии L точки, симметричные относительно целевой точки. После стандартных вычислений получают следующие соотношения (при, $r_A^2 \neq r_B^2$).

$$r_0 = \lambda r_A + (1 - \lambda) r_B$$

$$\lambda = \frac{1}{r_A^2 - r_B^2} \left(\frac{1}{4} (r_A - r_B)^2 - r_B^2 \right)$$

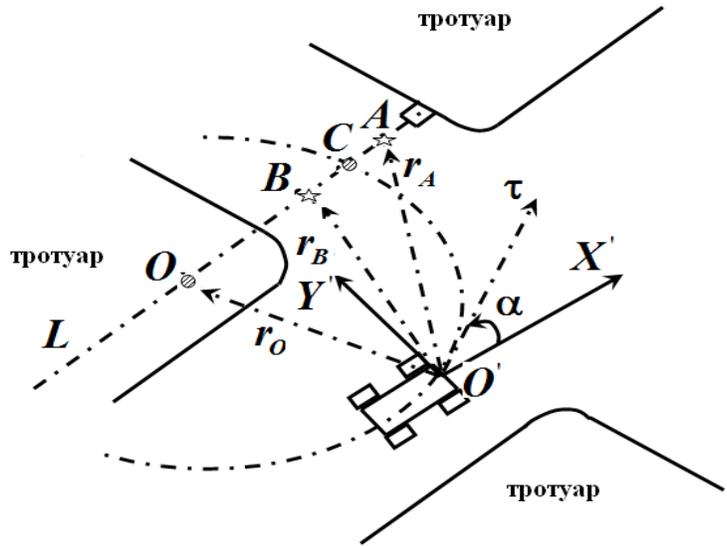


Рис.10. Движение робота на перекрестке (поворот налево)

Закон управления для кинематической модели выбирается в форме

$$\omega = k\alpha \tag{16}$$

где α – угол между осью X' и касательным вектором τ , проведенным в O' к программной траектории. В работе показано, что ошибка управления ищется из соотношения

$$\operatorname{tg}\alpha = -x_u / y_u, \text{ где } x_u, y_u \text{ – компоненты вектора}$$

$$u = (r_A + r_B)^T (r_A - 3r_B)r_A + (r_A + r_B)(3r_A - r_B)r_A$$

Апробация разработанных алгоритмов управления проводилась путем компьютерного моделирования движения МР с использованием динамической модели (9), при этом закон управления для динамической модели выбирается в виде $U_\varepsilon = k\alpha$ (вместо(10)) (рис.11). В начальный момент времени робот неподвижен, находится в положении $x_R = 2\text{ м}, y_R = 2\text{ м}$ с нулевой ориентацией, а целевая точка находится в положении $x_C = 4.5\text{ м}, y_C = 4\text{ м}$.

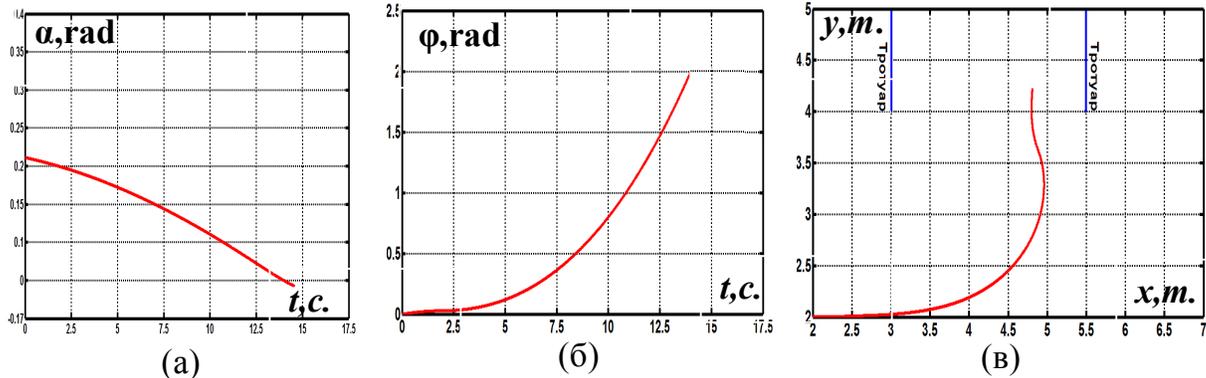


Рис. 11. Изменения $\alpha(t)$ (а), $\varphi(t)$ (б), $x(t)$ и $y(t)$ (в) робота при использовании нелинейной модели

В главе рассмотрена также задача преодоления статических препятствий, возникающих в процессе движения МР в виде стоящих около тротуара автомобилей. Для её решения используется стандартный алгоритм A^* , а также

разработанный метод локализации. Способ состоит в планировании траектории МР, в зависимости от текущих показаний 3D дальномера (рис.12).

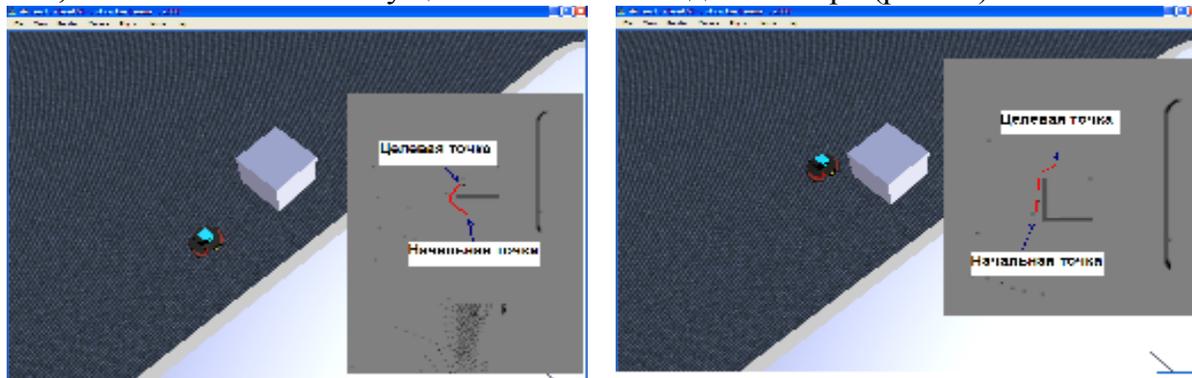


Рис.12. Планирование пути по карте, полученной из одного текущего скана дальномера

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов навигации и управления МР в среде Microsoft Robotic Developer Studio (MRDS).

MRDS – это набор визуальных и симуляционных инструментов для создания многофункционального робота. MRDS включает в себя специальную программную модель для создания асинхронных приложений, а также набор визуальных и симуляционных инструментов, которые используются в процессе создания программного обеспечения для роботов. Все эксперименты проведены на симуляторе этой платформы. Робот оснащен 3D виртуальным лазерным сканирующим дальномером с диапазоном измерения расстояния до 30 метров, по горизонтальному углу - 180°, по вертикальному углу - 100° и дискретностью 1°. Система управления МР построена в среде MRDS. 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. 13).

Система управления мобильным робототехническим комплексом имеет иерархическую архитектуру. Нижний уровень представлен модулями взаимодействия с виртуальным оборудованием и датчиками робота, промежуточный уровень формируют модули обработки информации и автоматического управления, а уровень взаимодействия с пользователем представлен графическим интерфейсом.

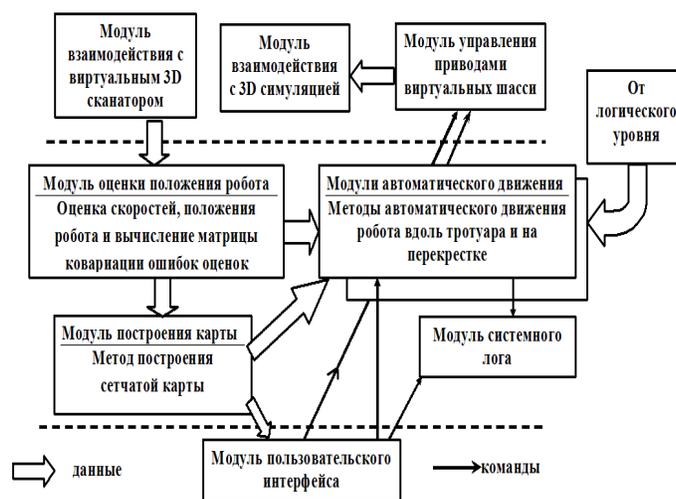


Рис. 13. Архитектура системы управления

Модуль оценки положения робота рассылает информацию о текущем состоянии робота, совмещенную с дальнометрическими изображениями, для которых определены параметры движения. На основании этой информации модуль построения карты создает план сечения рельефа, который, в свою очередь, доставляется в виде сообщений в модуль автоматического движения робота, а также в модуль пользовательского интерфейса. Команды пользователя рассылаются, при ручном управлении, от джойстика напрямую в модуль управления приводами виртуальных шасси. С модулем управления приводом виртуальных шасси также взаимодействуют модули управления автоматическим движением робота.

Логический уровень системы управления движением мобильного робота в городских условиях с препятствиями, основан на смене стратегий поведения, в зависимости от ситуации. Информация дальнометра и внешняя карта дороги с целевыми точками поступают во входные каналы логического уровня управления движением робота. На рис. 5 приведена карта, полученная при работе системы управления с моделью МР в среде MRDS. Проведено моделирование определения параметров собственного движения робота по известным дальнометрическим измерениям, при движении робота по гладкой неплоской поверхности. Робот двигался 20м вперед с постоянной линейной скоростью $v = 0.5$ м/с. Графики изменения параметров положения робота, определенных с помощью разработанного алгоритма, представлены на рисунке (14).

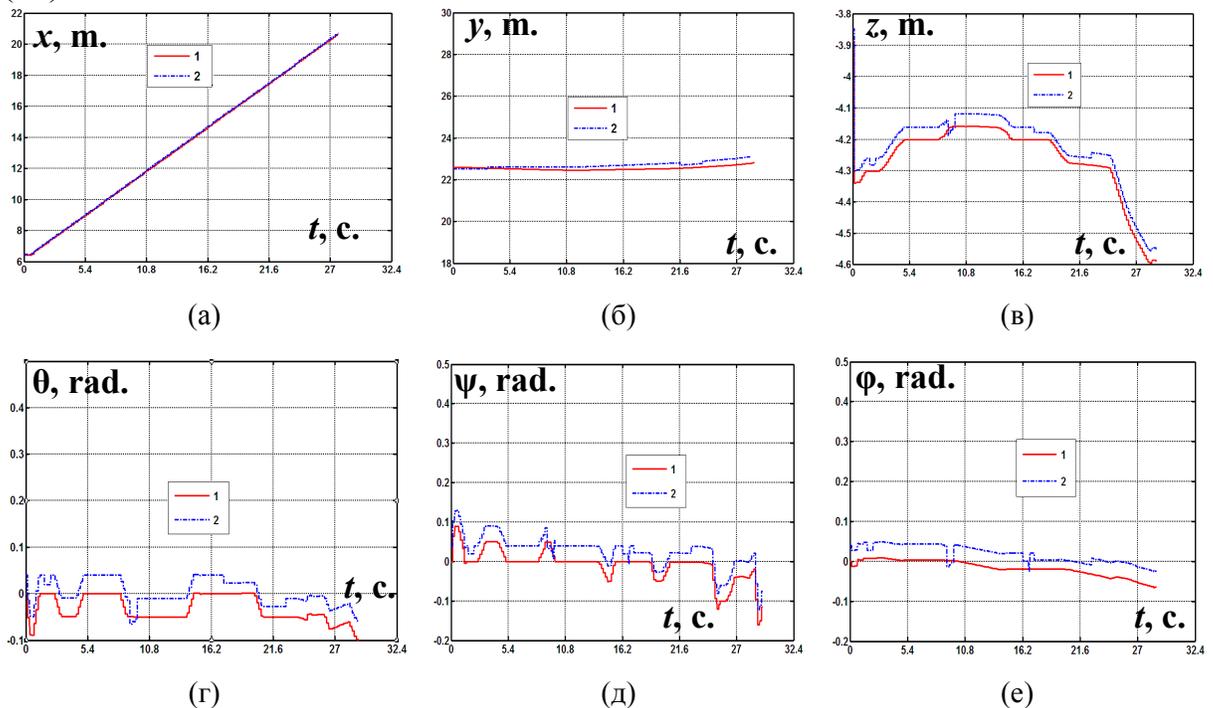


Рис.14. Параметры положения робота $x, y, z, \theta, \psi, \phi(1)$ и их оценки

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\theta}, \hat{\psi}, \hat{\phi}(2)$, определенные с помощью разработанного алгоритма

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

Основные результаты и выводы.

- Разработан метод построения трехмерной карты на основе данных, полученных от 3D дальномера. В отличие от существующих методов, основанных, в основном, на использовании итерационных процедур поиска экстремума функции близости в 6-мерном пространстве параметров движения, разработанный метод основан на решении линейной системы уравнений, и позволяет, в частности, получать точностные характеристики параметров движения.
- Исследованы статистические параметры шумов в псевдоизмерениях, что позволяет использовать хорошо разработанные рекуррентные методы оценивания при нахождении оценок параметров движения робота.
- Показана возможность получения множества двумерных карт, как плоских сечений 3D карты, которые могут быть использованы при управлении движением мобильного робота.
- Разработан способ управления движением робота вдоль тротуара и на перекрестке в городских условиях.
- Исследован разработанный алгоритм управления движением с использованием динамической модели автономного колесного МР и проведен параметрический синтез закона управления, обеспечивающий асимптотический характер траектории.

Результаты моделирования, проведенные в среде Matlab и Microsoft Robotic Developer Studio, подтвердили полученные в работе результаты.

Публикации.

1. Зенкевич С.Л., Минин А.А., Све Лин Хту Аунг. Построение пространственного плана мобильным роботом //Экстремальная робототехника: Труды всероссийской научно-практической конференции. СПб.,2009. С.269-271.
2. Све Лин Хту Аунг. Управление движением мобильного робота вдоль непрерывного тротуара по информации от лазерного дальномера //Студенческий научный вестник. 2009. №8. С.219-220.
3. Зенкевич С.Л., Минин А.А., Све Лин Хту Аунг. Ещё одно решение задачи построения 3D карты //Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №6. С.55-61.
4. Све Лин Хту Аунг. Управление движением мобильного робота вдоль тротуара по данным лазерного дальномера //Экстремальная робототехника: Труды международной конференции с элементами научной школы для молодёжи. СПб., 2010. С.272-277.
5. Све Лин Хту Аунг. Параметрический синтез закона управления движением мобильного робота в городских условиях //Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана.Приборостроение. 2011. №1. С.46-56.