

## АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПО ПРОЙДЕННОМУ МАРШРУТУ

В.Б. Моисеенко, О.А. Архипова (ОАО «СКБ ПА»)

Предложен способ позиционирования мобильного робота по видеоизображениям, позволяющий при достаточно простой обработке и компактной форме записи пройденного маршрута обеспечить возврат мобильного робота по пройденному пути в случае потери дистанционного управления, проведена оценка точности позиционирования и приведены результаты моделирования возврата робота по записанным углам в MATLAB.

Ключевые слова: позиционирование робота, обработка видеоизображения, оценка точности, моделирование алгоритма управления движением.

### Введение

При применении дистанционно управляемых роботов возникает задача определения их местоположения и возможного автоматизированного движения. Одним из видов такого автоматизированного движения может быть возврат робота по пройденному пути в точку старта при потере дистанционного управления. Эта задача достаточно актуальна, т.к. возможен также заезд робота при выполнении задачи за не радиопрозрачные препятствия. Решение данной задачи на роботе требует наличия на нем системы позиционирования. При применении для этого систем спутниковой навигации необходимо соблюдение ряда условий, выполнение которых не всегда возможно. Это, в первую очередь, наличие достаточно открытого пространства с достаточно ровной поверхностью. Особенно сложно данную задачу решать в населенных пунктах и в помещениях, где ошибка позиционирования будет приводить к столкновениям робота с объектами окружающей обстановки. Наличие на борту робота телевизионной системы, в принципе, позволяет создать на нем систему позиционирования, позволяющую определять положение робота относительно окружающих предметов с достаточно высокой точностью. При этом характерной особенностью систем визуального позиционирования является увеличение точности при приближении к окружающим предметам, что существенно уменьшает вероятность столкновения с ними. В настоящее время используются два принципиально разных подхода к визуальному позиционированию: геометрический и семантический. При первом — на изображении выделяются характерные точки, относительно которых и производится позиционирование. Во втором — производится рас-

познавание наблюдаемых объектов, определение их положения и границ. Очевидно, что второй подход существенно сложнее в реализации, но и обладает значительно большими возможностями по автономному управлению движением роботом. При дистанционном управлении, когда автономное движение является, по сути, вспомогательным режимом, целесообразно использование первого подхода. При этом возможности автономного движения во многом будут определяться выбором характерных точек изображения. Для возврата по пройденному пути необходимо записывать маршрут движения относительно этих характерных точек.

### Постановка задачи

Будем рассматривать движение робота в плоскости горизонта. Такое упрощение незначительно снижает возможности по записи маршрута, но значительно упрощает проблему. Будем считать, что телекамера также находится в плоскости горизонта. Тогда ее можно рассматривать как угломерный инструмент с точностью равной: (угол зрения)/(число пикселей изображения по горизонтали). При этом число пикселей между двумя объектами будет определять угловое расстояние между ними из точки нахождения робота. Пусть объекты представляют точки на плоскости.

Для однозначного определения местоположения робота необходимо измерение двух углов между тремя объектами (рис. 1). Для записи маршрута достаточно отслеживать положение объектов и записывать в память бортовой системы с некоторой периодичностью. Обратное движение по пройденному маршруту легко осуществить по восстановлению угловых положений объектов в записанных точках.

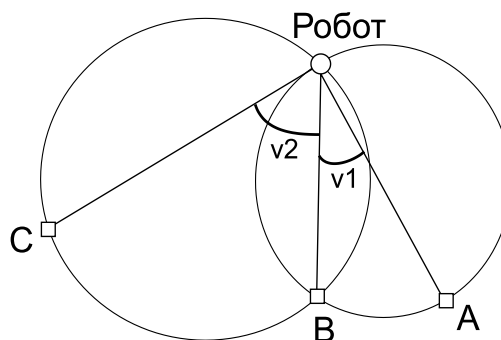
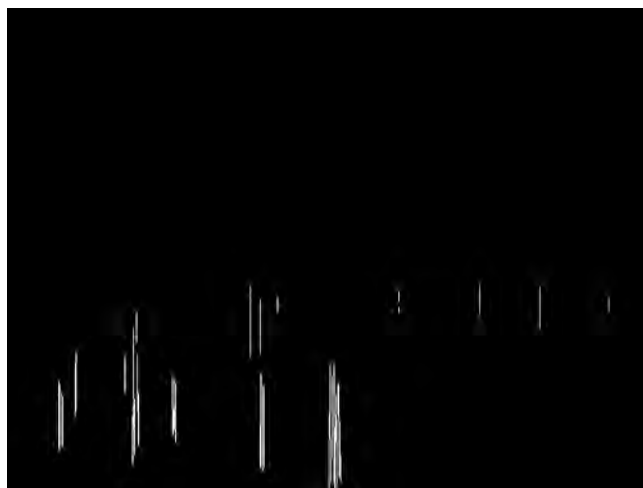


Рис. 1. Ориентация робота по трем точкам



а)



б)



в)



г)

Рис 2. Результаты выделения вертикальных линий: а) городской пейзаж, б) выделенные вертикальные линии в городском пейзаже, в) снимок помещения, г) выделенные вертикальные линии на снимке помещения

Для измерения углов между объектами с помощью телекамеры необходимо такое преобразование изображения, при котором предметы или их части можно рассматривать как точки на плоскости. В общем случае, такое представление может быть получено выделением элементов изображения с учетом аффинных преобразований. Для решения поставленной задачи наиболее интересны фильтры, выделяющие вертикальные элементы. Особенность вертикальных элементов — сохранение вертикального положения при перемещении робота. Выделенные вертикальные изображения можно рассматривать как точки на плоскости перемещения робота. Существуют достаточно простые фильтры, позволяющие выделить вертикальные элементы изображений. Наиболее известными фильтрами такого рода являются фильтры Собела и Превитта [1]. Для очистки изображения от мелких элементов можно использовать медианный фильтр.

Примеры фотоизображений в населенных пунктах и помещениях и обработанные пороговые двоичные изображения, полученные с помощью фильтра Со-

бела и медианного фильтра, приведены на рисунке 2.

Как можно видеть из рисунка 2 на всех изображениях достаточно четко выделяются вертикальные линии, которые можно использовать в качестве объектов засечки. Причем данных линий ограниченное количество. Данное обстоятельство позволяет следить за вертикальными линиями при движении робота, поскольку они смещаются незначительно.

Отметим следующие особенности движения вертикальных линий по экрану при движении робота. При движении в направлении обзора линии предметов, находящихся левее направления движения робота, сдвигаются влево; линии предметов, находящихся правее направления движения робота, сдвигаются вправо; скорость сдвига определяется расстоянием до объектов и скоростью робота. При повороте робота происходит перемещение линий в направлении противоположном повороту без изменения расстояний между линиями. Совмещение линий (например, линий А, В в точке 2 на рис. 3) при движении робота означает, что одна из линий была закрыта объектом,

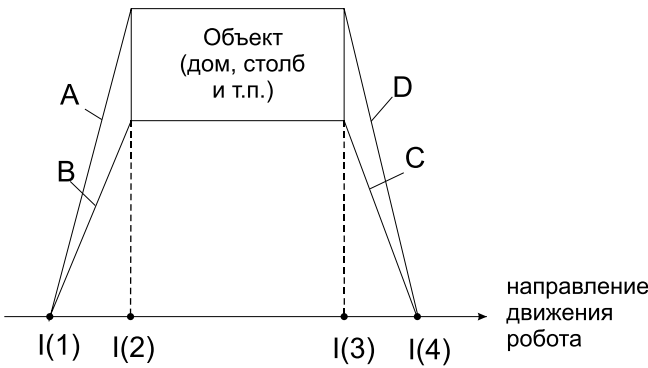


Рис. 3. Положение вертикальных линий (A, B, C, D) при движении робота, где I(1), I(2), I(3), I(4) – изображения на экране в точках 1, 2, 3, 4 соответственно

находящимся ближе к роботу. Какая из линий закрыта можно определить по скорости их движения, так как дальняя линия будет иметь меньшую скорость движения. Аналогично при появлении новой линии (выглядит как разделение линии на экране) (изображение на экране в точке 3 на рис. 3) появившаяся линия будет иметь меньшую скорость движения.

Таким образом, для записи траектории движения робота достаточно с некоторой периодичностью записывать в память положение нескольких характерных вертикальных линий. При обратном движении необходимо определять положение линий на экране и осуществлять необходимые развороты робота так, чтобы положение и расстояние между линиями соответствовали записанным. Такая запись будет достаточно экономной и может быть выполнена на достаточно простой бортовой информационной системе робота. В случае крена робота, для определения вертикальных линий объектов необходимо измерение крена и поворот изображения на соответствующий угол перед обработкой фильтром.

Очевидно, что использование автоматизированного движения робота целесообразно только в случае достаточной точности его выполнения. Точность выполнения при отсутствии динамических ограничений (малой скорости робота) в основном определится точностью записи маршрута движения. Для оценки точности записи маршрута рассмотрим схему измерения углов (рис. 4).

Точность записи будет определяться ошибкой измерения угла, складывающейся из ошибки квантования ПЗС матрицы и ошибки, вызванной абберацией объектива ТВ камеры.

Ошибка измерения угла за счет квантования ПЗС матрицы равномерно распределена в интервале  $[-\delta, \delta]$  с дисперсией  $1/6\delta^2$ , где  $\delta$  – угол между двумя точкам, проецируемыми на центры двух соседних пикселей ПЗС матрицы. Для случая, когда размер матрицы существенно меньше фокусного расстояния

$$\delta = 2 \arctg(m/2fR), \quad (1)$$

где  $m$  – размер ПЗС матрицы;  $f$  – фокусное расстояние объектива;  $R$  – разрешение матрицы в пикселях

Для видеокамер CNB-AP200L и VB21C-R43  $\delta = 0,12^\circ$  и  $\delta = 0,16^\circ$  соответственно.

Для ошибок, вызванных абберацией, для данных камер были экспериментально определены зависимости измеренных углов от угла отклонения от оси объектива (рис. 5).

Для достаточно недорогих камер, применяемых в настоящее время, на роботах ошибки измерения углов из-за абберации существенно больше ошибок квантования. Однако, учитывая, что величина ошибки меняется почти линейно, возможна компенсация данной ошибки линейной поправкой. Такая поправка для видеокамеры CNB-AP200L  $R = 0,034$  пикселя/градус и для видеокамеры VB21C-R43  $R = 0,01$  пикселя/градус. При этом ошибка измерения угла не будет более 0.5%. Отметим, что для задачи возвращения робота по пройденному маршруту ошибку абберации можно не учитывать, так как при этом вертикальные линии наблюдаются под углами близкими к тем, при которых производилась запись маршрута.

Для увеличения точности возможно измерение нескольких углов и усреднение ошибки. При равномерном распределении ошибки квантования общая дисперсия ошибки определится следующим соотношением [2]:

$$\bar{\varepsilon}_n^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_y^2}{6} + \delta_y^2 \right) + \left( \bar{y} \right)^2 \quad (2)$$

где  $\delta_y^2$  – дисперсия ошибки абберации,  $y$  – математическое ожидание ошибки абберации.

Рассмотрим возможный алгоритм работы бортовой системы управления, обеспечивающей достаточно точное возвращение по пройденному маршруту на основе записанной угловой информации. Очевидно, что движение должно осуществляться от одной точки позиционирования к другой.

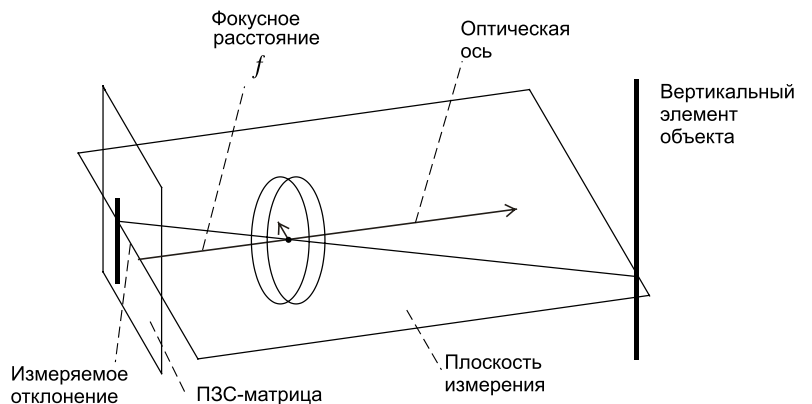


Рис. 4. Схема измерения угла с помощью видеокамеры

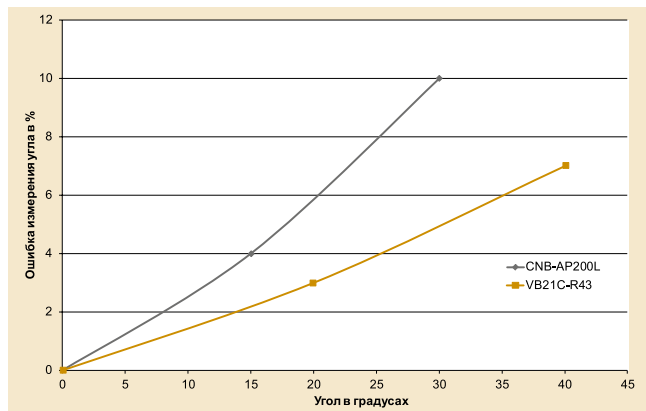


Рис. 5. Ошибка измерения углового размера объекта величиной  $12^\circ$  в зависимости от угла отклонения от оптической оси  $\beta$

Положение робота однозначно определяется двумя углами между тремя вертикальными элементами на изображении и углом между осью робота и направлением на любой из вертикальных элементов, поэтому их можно рассматривать как обобщенные координаты робота.

Пусть движение рассматривается на плоскости, на которую проецируются вертикальные элементы в виде точек. Поскольку координаты точек не известны и не могут быть измерены, в качестве координат робота будем рассматривать углы при его движении между этими элементами. Рассмотрим для примера, что таких точек три —  $A, B, C$ , а два угла  $AB$  и  $BC$  будем считать текущими координатами робота. Будем записывать данные углы в память управляющей системы робота при его движении при дистанционном управлении через дискретные промежутки времени. Тогда текущие координаты робота на  $i$ -том промежутке  $AB_i$  и  $BC_i$ . Пусть необходим возврат робота из этой точки по пройденному пути.

Для этого определим в качестве следующей целевой точки, точку с обобщенными координатами  $AB_{i-1}$  и  $BC_{i-1}$ . Очевидно, что при приближении к точкам углы  $AB$  и  $BC$  возрастают, а при удалении от точек уменьшаются, т.е. если  $AB_i > AB_{i-1}$  необходимо двигаться в направлении, противоположном направлению биссектрисы угла  $AB_i$ , а если  $AB_i < AB_{i-1}$ , в направлении биссектрисы угла  $AB_i$ . Определим вектор  $r_{AB_i}$ , длину которого определим как  $(AB_i - AB_{i-1})/AB_i$ , а направление по биссектрисе угла в направлении уменьшения различия углов. Аналогично определим вектор  $r_{BC_i}$ . Тогда вектор необходимой скорости движения в точку  $i-1$  определим как  $r = c * r_i = c * (r_{AB_i} + r_{BC_i})$ , где  $c$  — коэффициент, зависящий от скорости робота. Движение робота в данном направлении для гусеничного робота возможно задним ходом для того, чтобы точки оставались в поле зрения видеоканера, для колесного робота необходим разворот на  $180^\circ$  с наблюдением точек в кормовую каме-

ру. При движении к точке  $i-1$  необходима постоянная коррекция вектора  $r$  в соответствии с реальными изменениями углов  $AB$  и  $BC$  по их близости углам  $AB_{i-1}$  и  $BC_{i-1}$ . При достижении окрестности точки  $AB_{i-1}, BC_{i-1}$ , в качестве цели движения выберем точку  $AB_{i-2}, BC_{i-2}$ .

При позиционировании по трем точкам возможно возникновение ситуации «плохой окружности», т.е. ситуации, когда точка положения робота и точки  $A, B, C$  лежат на одной окружности. При этом определение текущих координат робота по двум углам становится невозможным. Для исключения подобной ситуации, а также для повышения точности позиционирования желательно использовать большее количество углов между вертикальными элементами. В связи с этим предлагается следующий рекуррентный квази-градиентный алгоритм выбора направления движения.

Углы между вертикальными элементами пронумеровать, начиная с правого элемента, как  $\varphi_1, \dots, \varphi_m$ ;

1) определяется разность углов между измеренными и записанными в память угловыми расстояниями  $\Delta\varphi_1, \dots, \Delta\varphi_m$ ;

2) вектор движения вычисляется по формуле (3):

$$\vec{r} = c \left( \sum_{j=1}^m \frac{\Delta\varphi_j}{\varphi_j} e^{i \left( \sum_{k=0}^{j-1} \varphi_k + \frac{\varphi_j}{2} \right)} \right), \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  — угол между действительной осью комплексной плоскости и направлением на первый вертикальный элемент;  $c$  — коэффициент, зависящий от скорости движения робота.

Расчет можно производить, считая  $\varphi_0 = 0$ . Для движения вдоль вектора  $r$  необходимо, чтобы продольная ось робота была направлена вдоль вектора. Это обеспечивается расположением точки с углом  $\varphi_r$  в центре экрана, тогда угол  $\varphi_0$  определится как разница между правым элементом и границей экрана;

3) если  $|r| > \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — необходимая точность, выполняется движение вдоль вектора  $\Delta t$  времени, в противном случае для расчета берутся следующие, хранящиеся в памяти расстояния;

4) повторяется выполнение алгоритма с п. 1.

Для двух углов данный алгоритм совпадает с процедурой возврата, описанной выше.

Для проверки работоспособности данного алгоритма было проведено его моделирование в SIMULINK для гусеничного шасси.

Модель состоит из трех блоков (рис. 6).

Здесь  $\vec{\varphi}_{np} = \left| \varphi_{np,i} \right|_{i=1}^N$  — вектор программных обобщенных координат (точек на траектории),

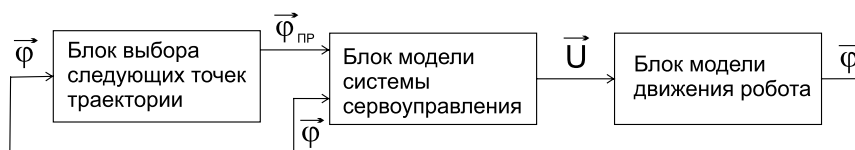
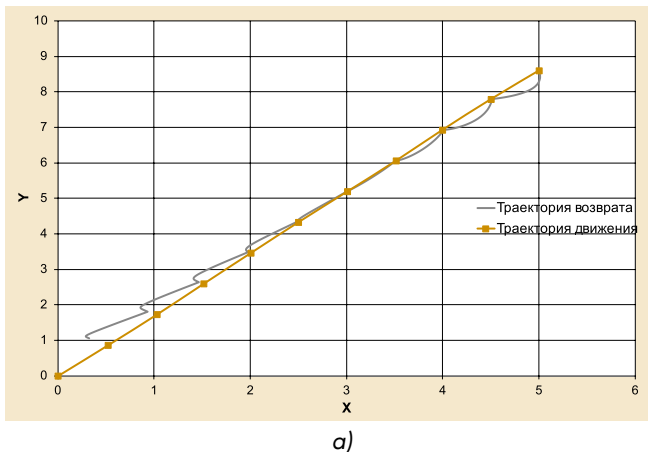
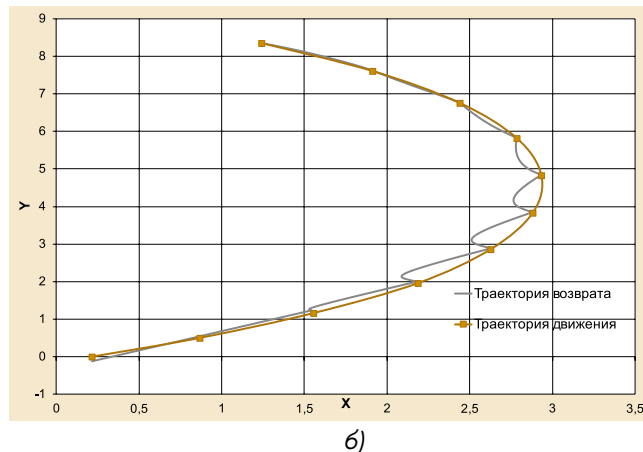


Рис. 6. Схема модели возврата робота по записанным точкам траектории





а)



б)

Рис. 7. Результаты моделирования возврата робота при первоначальном движении по прямой а) и изогнутой б) траектории

$\vec{\phi} = \{\phi_i\}_{i=1}^N$  — вектор текущих обобщенных координат,

$\vec{U} = \{U_{np}, U_{лев}\}$  — управляющие напряжения на при-

водах правой и левой гусениц.

Блок выбора следующей точки выдает следующую программную точку траектории при попадании робота в окрестность точки  $\phi_{пр}$ .

Блок модели системы сервоуправления реализует квазиградиентный алгоритм.

Блок модели движения моделирует движение робота под действием управляющих напряжений  $\vec{U}$  без проскальзывания.

Вектор  $\vec{U}$  формируется в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_1 &= K_1 * |\dot{\varphi}| - K_2 * (\varphi_r - \varphi_t), \\ U_2 &= K_1 * |\dot{\varphi}| + K_2 * (\varphi_r - \varphi_t), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varphi_r$  — угол в радианах вектора  $\mathbf{r}$  в системе координат робота;  $\varphi_t$  — текущий курсовой угол в радианах робота в системе координат робота.

Движение происходило относительно трех точек с координатами  $A(10,0)$ ,  $B(10,10)$ ,  $C(0,10)$  по прямой под углом  $60^\circ$  и по кривой, заданной соотношением  $\alpha = \pi/6 + 0,2*$ .

Численные эксперименты позволили определить приемлемые величины коэффициентов  $C=0,1$ ,  $K_1=0,2$ ,  $K_2=12$ . При этом возврат происходил по траектории, близкой к траектории прямого движения (рис. 7).

Важным вопросом при использовании данного алгоритма является выбор используемых углов. Углы между вертикальными элементами при движении робота можно разделить на три группы:

1. Углы, которые при движении робота практически не меняются — объекты, дающие вертикальные элементы, расположены на большом расстоянии от робота.

2. Углы, меняющиеся существенно.

3. Углы с вертикальным элементом, находящиеся на краю телевизионного изображения.

Очевидно, что для данного алгоритма может использоваться только второй тип углов. Это требует селекции вертикальных элементов углов по скорости изменения углов и их местоположения.

### Заключение

Результаты моделирования показали возможность создания автоматизированной системы возврата робота по пройденной траектории с помощью записи относительного углового положения точек на траектории. При этом алгоритм возврата не содержит сложных вычислений и может быть реализован на бортовом компьютере робота. Записанный маршрут, пройденный в режиме дистанционного управления, может рассматриваться как программная траектория, полученная в режиме обучения. Это позволит роботу не только возвратиться по пройденному пути автономно, но и повторить пройденный маршрут при необходимости. Записанный маршрут может передаваться по каналам связи на другие роботы, которые также смогут двигаться по данному маршруту автономно. Записанный маршрут может рассматриваться как образец для обнаружения новых объектов на маршруте движения робота.

### Список литературы

1. Гансалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: «Техносфера», 2006.
2. В.М. Ефимов. Квантование по времени при измерении и контроле. Москва, «Энергия», 1969.

**Моисеенко Владимир Борисович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,  
**Архипова Ольга Александровна** — магистрант, инженер-конструктор ОАО «СКБ ПА».

Контактный телефон 8-904-261-72-20.

E-mail: mvb@oao-skbpa.ru; Olgau108@mail.ru