



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 25 за 2015 г.



Давыдов О.И., [Платонов А.К.](#)

Алгоритм управления
дифференциальным
приводом мобильного
робота РБ-2

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Давыдов О.И., Платонов А.К. Алгоритм управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2 // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 25. 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-25>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

О.И. Давыдов, А.К. Платонов

**Алгоритм управления дифференциальным
приводом мобильного робота РБ-2**

Москва — 2015

Давыдов О.И., Платонов А.К.

Алгоритм управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2

В работе представлен алгоритм управления движением мобильного робота, оснащённого дифференциальным приводом и опорными омни-колёсами. Приводится подробное описание алгоритма и метода его настройки. Описывается программа-имитатор, которая моделирует динамику движения робота по горизонтальной поверхности. С помощью имитатора подбираются настроечные параметры для алгоритма управления приводом. Далее программное обеспечение испытывается на реальном роботе РБ-2, настроечные параметры корректируются. Описанный подход позволил создать эффективный алгоритм управления движением за достаточно короткое время, сведя к минимуму его испытания на реальном роботе.

Ключевые слова: мобильный робот, омни-колёса, модель динамики движения, алгоритмы управления движением, робот РБ-2

Oleg Izmailovich Davydov, Alexander Konstantinovich Platonov

A control algorithm for a differential drive of RB-2 mobile robot

This paper presents a motion planning algorithm for a mobile robot equipped with differential drive and omni-wheels. It describes in detail the algorithm and its tuning parameters as well as a simulation program that models dynamic horizontal movement of the robot. The simulation program selects optimal parameters for the differential drive control algorithm which are further adjusted based on real-life testing of RB-2's movement control software. An approach described in this paper allows to create an efficient motion planning algorithm in a relatively short time while minimizing its testing on a physical robot.

Keywords: mobile robot, omni-wheels, movement dynamics model, motion planning algorithms, robot RB-2

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-06431.

Оглавление

1. Введение	3
2. Алгоритм управления движителями робота РБ-2	6
3. Имитатор движения робота	8
4. Подбор параметров на имитаторе	11
5. Результаты натурных экспериментов	14
6. Заключение	16
Список литературы	16

1. Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к созданию и использованию робототехники в различных сферах деятельности человека. Создается большое количество сервисных роботов, которые по своему назначению должны выполнять услуги для людей. Действуя полуавтономно или полностью автономно, они должны работать внутри помещений: в городских квартирах, в больницах, офисах, музеях, магазинах, учебных заведениях – в окружении нормально передвигающихся людей. Такая среда является слабо динамической, она последовательно и непрерывно меняется, но не с очень большой скоростью и не кардинально. Система управления робота должна постоянно подстраиваться под эти изменения, вовремя реагировать на них, оценивать ситуацию и перестраивать режим движения.

Предлагаемая работа описывает систему управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2 (рис. 1). Робот предназначен для работы в динамически изменяющейся среде обитания человека в помещениях, где он должен полуавтономно выполнять различные команды человека и перемещаться внутри этих помещений.

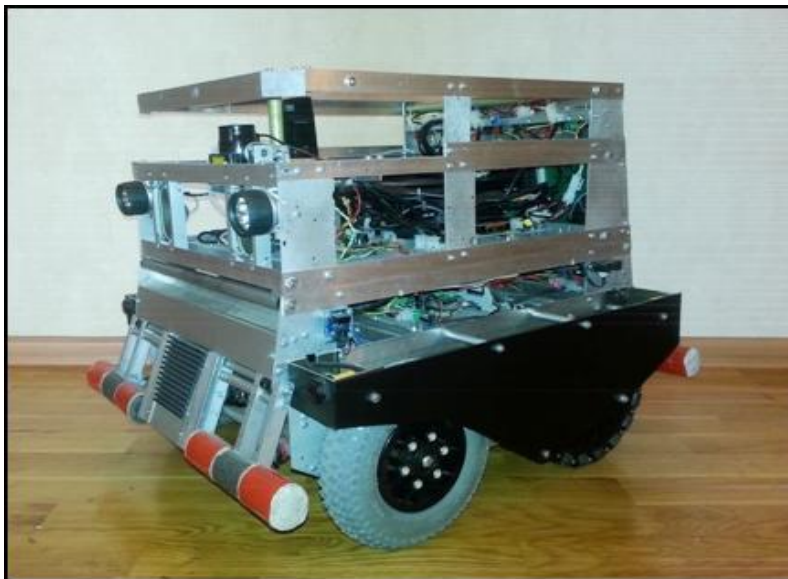


Рис. 1. Робот РБ-2 в жилом помещении

Робот РБ-2 оборудован контактными датчиками препятствий, инфракрасными и ультразвуковыми датчиками расстояний. На корпусе робота установлен лазерный сканер, который является основным источником данных для системы управления движением робота. Программное обеспечение полного состава системы управления установлено на бортовом компьютере с двухъядерным процессором Intel, тактовой частотой 1.8 ГГц, работающим под управлением операционной системы Windows 7 Embedded.

Система управления мобильного робота имеет иерархическую архитектуру, на нижнем уровне которой находится описываемая ниже

система управления дифференциальным приводом ведущих колес робота.

В современной научно-технической литературе опубликовано много работ, посвященных построению алгоритмов управления движением мобильного робота (см., например, [1]...[10]). Большое число этих публикаций описывает алгоритмы управления движением робота с дифференциальным типом привода его движителя. Это связано как с высокой подвижностью движителя с дифференциальным управлением по сравнению с движителем автомобильного типа, так и с тем обстоятельством, что в европейских и отечественных соревнованиях роботов в их регламентах был стандартифицирован именно дифференциальный тип конструкции движителей соревнующихся роботов.

подавляющее большинство алгоритмов построения способа требуемого перемещения в пространстве строятся на базе трех основных сценариев:

1. управление движением в целевую точку без построения траектории;
2. управление движением по целевой траектории;
3. преследование виртуальной цели, двигающейся по целевой траектории.

Все три сценария предполагают, что исходной информацией для системы управления робота является отклонение текущего положения робота от целевого положения, т.е. так или иначе они используют **позиционную ошибку**. Большинство алгоритмов, хотя и не все, предполагают также, что система управления должна принимать во внимание и отклонение направления вектора скорости или продольной оси робота от целевого направления по углу, т.е. учитывать и **угловую ошибку**.

В части опубликованных алгоритмов требуется информация об отклонении текущего значения модуля скорости движения от целевого значения, т.е. учитывается и возникающая **ошибка в скорости**.

Система управления должна постоянно вырабатывать управляющие сигналы для движителей, чтобы минимизировать эти ошибки, но при этом формировать комфортный режим движения, который исключал бы слишком большие или слишком малые скорости и ускорения движения и не создавал перегрузки тока в цепях питания приводов движителя.

Основное отличие между упомянутыми сценариями заключается в методе формирования целевого положения.

- Первый сценарий требует от системы управления формирования только координат целевой точки и, дополнительно, вектора скорости робота, которую он должен иметь в этой целевой точке.
- Второй и третий сценарии предполагают, что система управления постоянно и в явном виде формирует координатную траекторию, по которой робот и должен перемещаться.
- Третий сценарий отличается от второго тем, что здесь дополнительно к формированию траектории движения в явном или неявном виде должна формироваться и скорость движения виртуальной цели (в виде

функции, зависящей от времени или от расстояния до цели).

В статической операционной среде система управления, использующая второй или третий сценарий, формирует целевую траекторию так, что робот, двигаясь по ней, не будет задевать препятствия. В динамической операционной среде, когда препятствия, окружающие робота, меняют своё положение или даже постоянно двигаются, возникает необходимость достаточно часто пересчитывать траекторию, что увеличивает задержки в формировании управляющих сигналов и может привести к тому, что робот будет неадекватно реагировать на неожиданные изменения среды.

Алгоритм управления движением робота РБ-2 использует первый сценарий наряду с обычным методом подцелей. В процессе движения верхние уровни системы управления на каждом такте их работы производят анализ операционной среды и формируют локальную подцель в виде координат точки, к которой робот должен двигаться, и скорости, которую робот должен иметь в этой точке. Локальная подцель всегда находится на небольшом расстоянии от робота, причем она выбирается так, чтобы робот мог двигаться, не задевая окружающих его предметов и людей.

Из-за возможного движения объектов в операционной среде на пути робота могут возникать новые идентифицируемые препятствия. В таком случае система построения поведения робота создает новую локальную подцель его движения и передает ее на нижний уровень построения движения. На этом уровне полученная подцель движения регулярно используется для формирования текущих сигналов управления дифференциальным приводом.

Двигатель робота РБ-2 представляет собой подвижную платформу длиной 60 см, шириной 53 см, с двумя передними ведущими колесами, на осях которых установлены одометры, и двумя задними поддерживающими омни-колесами (см. рис. 2). Широко используемая в настоящее время в робототехнике конструкция омни-колес с их малым трением продольного и бокового качений обеспечивает легкость реализации любого требуемого прямолинейного и вращательного движения робота, хотя и вызывает определенные трудности управления движением (см. ниже).



Рис. 2. Передние и задние колеса робота РБ-2

Ниже приводится описание построенного алгоритма управления движением робота в упомянутых обстоятельствах вместе с описанием развитых модельных средств и методов для его успешной настройки и отладки автоматической езды среди препятствий движению в динамически изменчивом окружении робота.

2. Алгоритм управления двигателями робота РБ-2

При построении системы управления робота РБ-2 за основу был принят алгоритм, опубликованный в работе [8]. Алгоритм строится на базе известной зависимости между текущими угловой и линейной скоростями движения робота с дифференциальным приводом:

$$\omega = K \cdot v \quad (1)$$

Здесь: v – текущая линейная скорость движения робота;

ω – текущая угловая скорость движения корпуса робота;

K – кривизна траектории движения робота в данной точке.

На рис. 3 схематически изображены робот и его целевая позиция в системе координат, связанной с центром вращения робота в горизонтальной плоскости. Прямая линия, соединяющая центр вращения робота и целевую позицию, определяет направление, от которого ведется отсчет углов δ и θ . На рисунке видно, что:

δ – угол между направлением на целевую точку и текущим направлением движения робота;

θ – угол между направлением на целевую точку и вектором скорости робота в целевой точке;

r – расстояние между текущим положением робота и целевой позицией.

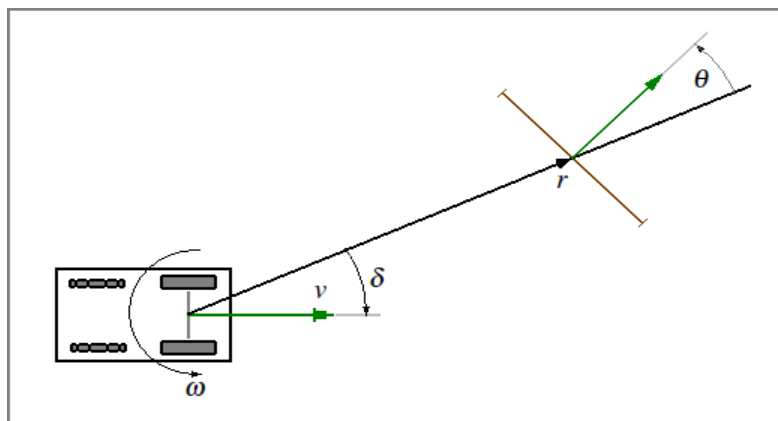


Рис. 3. Робот и его целевая позиция

Изменение кривизны вдоль траектории, которое в работе [8] является основой алгоритма управления движением, задается следующей функцией:

$$K(r, \delta, \theta) = -\frac{1}{r} [k_2(\delta - \arctan(-k_1\theta)) + (1 + \frac{k_1}{1 + (k_1\theta)^2}) \sin \delta] \quad (2)$$

Здесь k_1 и k_2 – настроечные коэффициенты, которые должны подбираться экспериментально. В работе [8] доказывается, что если k_1 и k_2 больше нуля, то выражение (2) обеспечивает сходимость алгоритма, т.е. асимптотическую устойчивость по Ляпунову в целевой позиции со значениями r , δ и θ , равными нулю.

Величину текущей линейной скорости движения робота в работе [8] предлагается выбирать как функцию кривизны траектории движения, причем исходя из следующих соображений. При большой кривизне траектории, когда робот круто поворачивает, линейная скорость движения должна быть близка к минимальной. При малой кривизне, когда робот движется почти по прямой линии, линейная скорость может быть большой, близкой к максимальной. Между этими двумя состояниями функция, описывающая зависимость линейной скорости от кривизны траектории, должна быть, по возможности, гладкой, без скачков и резких перегибов. В системе управления робота РБ-2 используется следующая зависимость:

$$\begin{aligned} v(K) &= \frac{v_{\max}}{1 + (k_3 \cdot K)^2} && \text{при } k_3 \cdot K < 1 \\ v(K) &= \frac{v_{\max}}{2 \cdot k_3 \cdot K} && \text{при } k_3 \cdot K \geq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь v_{\max} – максимально допустимая линейная скорость робота, а k_3 – настроечный параметр, который должен подбираться экспериментально. Если подставить выражения (3) в (1), то получим зависимость угловой скорости робота от кривизны траектории:

$$\begin{aligned} \omega(K) &= \frac{K \cdot v_{\max}}{1 + (k_3 \cdot K)^2} && \text{при } k_3 \cdot K < 1 \\ \omega(K) &= \frac{v_{\max}}{2 \cdot k_3} && \text{при } k_3 \cdot K \geq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Графики зависимости линейной и угловой скорости от кривизны, описываемые формулами (3) и (4), приведены на рис. 4. На графиках видно, что линейная скорость при нулевой кривизне равна v_{\max} , а при увеличении кривизны стремится к нулю. Угловая скорость равна нулю при $K=0$, далее при увеличении (уменьшении) K абсолютная величина ее растет до уровня $\omega = 0.5 * v_{\max} / k_3$ и на этом уровне стабилизируется и больше не меняется.

Механика подвижного основания робота РБ-2 позволяет ему поворачиваться на месте. Кривизна траектории поворота в этом случае равна бесконечности, а это не обеспечивается формулами (2), (3) и (4). В системе управления робота РБ-2 предусмотрен режим поворота на месте, который

используется в случае, если кривизна, рассчитанная по формуле (2), превышает некоторую пороговую величину K_{\max} .

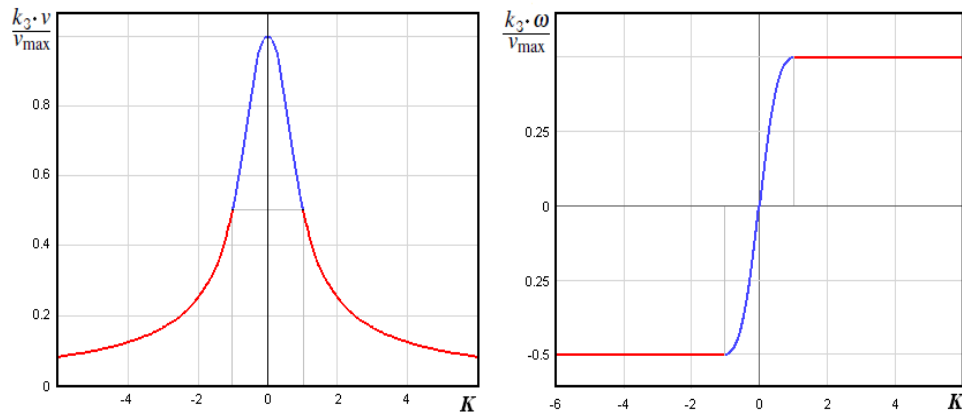


Рис. 4. Зависимость линейной и угловой скорости от кривизны

Режим поворота на месте описывается формулами:

$$v = 0, \quad \omega = k_4 \cdot v_{\max} \quad \text{при} \quad K \geq K_{\max} \quad (5)$$

Здесь k_4 – еще один настроечный параметр, подбираемый экспериментально.

Алгоритм управления движением робота в каждый момент движения в целевую позицию сводится к расчету по формуле (2) выбираемой текущей кривизны траектории. На основании полученного значения кривизны по формулам (3) и (4) рассчитываются требуемые величины линейной и угловой скорости робота. Если кривизна траектории оказывается больше пороговой величины K_{\max} , то используются формулы (5) режима разворота на месте.

Линейная и угловая скорости движения подвижной платформы робота преобразовываются в скорости вращения колес, которые и поступают на вход контроллера дифференциального привода:

$$\omega_R = v + \frac{d}{2} \omega, \quad \omega_L = v - \frac{d}{2} \omega \quad (6)$$

Здесь ω_R и ω_L – угловые скорости вращения правого и левого колеса робота, а d – расстояние между колесами.

3. Имитатор движения робота

Для подбора параметров в формулах (2), (3), (4) и (5) была создана программа-имитатор движения робота, заменяющая реального робота и формирующая ответную реакцию на управляющие сигналы, поступающие от программного обеспечения системы управления движением робота.

Обычно для создания имитатора подобного типа строится математическая модель робота в виде системы кинематических и/или

динамических уравнений движения корпуса робота, учитывающих определенную совокупность факторов, влияющих на это движение. При этом необходимо с высокой точностью знать значения таких параметров робота, как его геометрические размеры, масса, момент инерции и т.п. Кроме того, если учитывать большое число факторов, влияющих на движение робота, то это приводит к усложнению уравнений, описывающих модель движения и управления, что, в свою очередь, требует усложнения алгоритмов численных решений уравнений модели.

В настоящей работе был выбран другой – "феноменологический" – подход к созданию имитатора. Механико-электронная система робота в таком подходе рассматривается как некоторый черный ящик, кривые переходных процессов которого используются для построения имитатора. В нашем случае для получения параметров динамики движений робота на вход контроллера его приводов подавался управляющий сигнал в виде ступеньки, который соответствовал скачкообразному изменению требуемой скорости движения робота от нуля до некоторой величины. В результате робот разгонялся и выходил на режим движения с постоянной скоростью. Далее управляющий сигнал сбрасывался до нуля, и робот останавливался.

В процессе этих экспериментов с шагом по времени в 30 мсек, равным одному такту работы системы управления, регистрировались показания одометров. В памяти системы управления записывался переходной процесс получаемого движения в виде реакции динамической системы робота на ступеньку управляющего воздействия вверх и затем – на ступеньку вниз. Эксперименты проводились во всем диапазоне скоростей, доступных механико-электронной системе робота.

Эксперименты выявили следующие свойства робота. Оказалось, что во всем рабочем диапазоне скоростей величина управляющего сигнала, подаваемого на вход контроллера приводов робота, не влияет на характер переходного процесса при разгоне робота. Кривые, построенные для разных скоростей, имеют одинаковую форму и отличаются друг от друга только масштабом по вертикали. Это наблюдение подтвердило имевшиеся ожидания наличия почти линейных динамических свойств управляемого движения робота с фиксированной передаточной функцией реакций на сигналы управления.

На рис. 5 представлен пример кривой переходной функции при разгоне робота. Точками изображены скорости вращения колес реального робота, а сплошной линией – результат работы программы, заложенной в имитаторе движения. Здесь видно, что время выхода на постоянную скорость равно ~ 1200 мсек, с запаздыванием реакции системы на управляющий сигнал ~ 50 мсек. Напомним, что показана реакция инерционной системы на скачкообразный управляющий сигнал. Система рассматривается как черный ящик, в котором имеется покупной контроллер, замкнутый сигналами обратной связи.

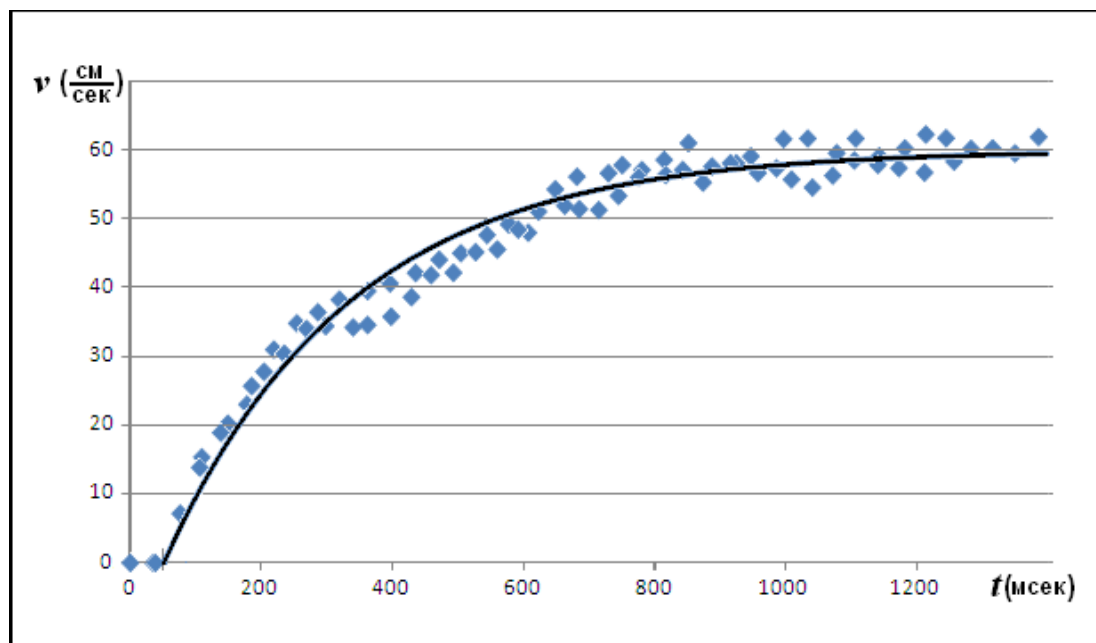


Рис. 5. Переходная функция скорости при разгоне робота

Наблюдаемая кривая очень похожа на экспоненциальный переходной процесс, характерный для модели динамического звена 1-го порядка с постоянной времени ~ 350 мсек. Однако после упомянутой задержки начала движения, связанной с инерционными свойствами нагруженного робота, последний разгоняется намного резвее модели разгона динамического звена первого порядка, что говорит о большом моменте двигателя и высоком коэффициенте П-регулятора скорости контроллера. Затем в результате действия сигналов обратной связи (их колебания хорошо видны на графике после 400 мсек движения) по мере приближения к заданной скорости процесс разгона затягивается.

На рис. 6 представлен пример кривой переходной функции при торможении робота. Здесь также точками изображены скорости вращения колес реального робота, а сплошной линией — результат работы программы имитатора движения. Очевидно, что запаздывание реакции системы на управляющий сигнал примерно такое же, как и при разгоне робота: оно равно ~ 60 мсек. Во всем остальном этот переходный процесс существенно отличается от процесса, характерного для разгона робота. Время, затрачиваемое на торможение прямо пропорционально скорости движения робота, а переходной процесс представляет собой почти линейную функцию времени (хотя некоторую S-образность записанных точек можно и заметить). В любом случае эффективность торможения заметно выше эффективности разгона, что вполне объяснимо влиянием трения в трансмиссии робота РБ-2.

Не вдаваясь в подробности неизвестного алгоритма коммерческого контроллера моторов робота, на основании таких данных была создана программа, которая моделирует реакцию механико-электронной системы робота на управляющие сигналы.

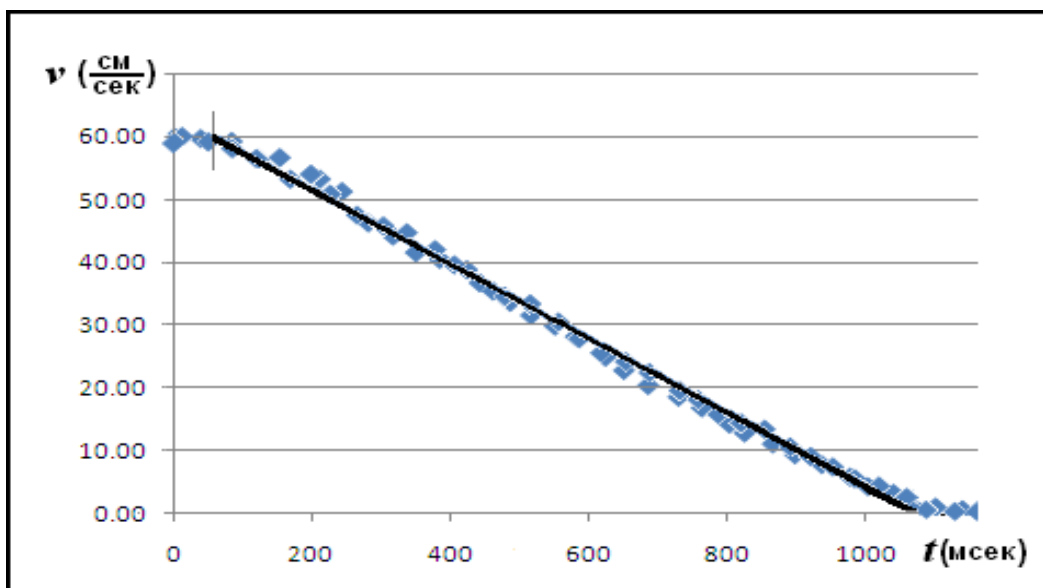


Рис. 6. Переходная функция скорости при торможении робота

В основу модели заложена рекурсивная формула изменения скорости твердого тела при разгоне/торможении с переменным/постоянным ускорением:

$$v(t+\Delta t) = v(t) + a \Delta t$$

$$a = C_1(V - v(t)) \quad \text{при разгоне}$$

$$a = -C_2 \quad \text{при торможении} \quad (7)$$

Здесь: C_1 и C_2 – константы, подбираемые экспериментально; Δt – интервал времени между двумя последовательными тактами работы системы управления; a – ускорение разгона/торможения робота, которое при торможении является константой, а при разгоне прямо пропорционально разнице между скоростью, соответствующей управляющему сигналу V , и скоростью на предыдущем такте управления. Как уже указывалось выше, на рисунках 4 и 5 сплошными линиями представлены результаты работы программы имитатора движения. Выходными параметрами этой программы являются значения, имитирующие показания одометров.

4. Подбор параметров на имитаторе

Для завершения построения алгоритма управления движителями робота необходимо подобрать значения шести параметров: v_{\max} , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 и K_{\max} . Для этой цели использовались два вида экспериментов: численные эксперименты на имитаторе и натурные опыты, которые проводились непосредственно на роботе.

Некоторые параметры невозможно подобрать на имитаторе. Например, значение параметра v_{\max} задается в соответствии с техническими ограничениями на работу приводов робота и с учетом безопасности движения путем уменьшения вероятности столкновения с окружающими

объектами. Этот параметр надежно определяется только в ходе натуральных экспериментов.

Параметры k_1 , k_2 и k_3 оказывают большое влияние на характер движения робота и на его возможности достижения заданной подцели. Эти коэффициенты легко подбираются на имитаторе с достаточно высокой точностью. Параметры k_4 и K_{\max} влияют на движение робота в режиме поворота на месте и на переходы его в этот режим и обратно. Характер движения робота в режиме поворота на месте не очень хорошо наблюдается на имитаторе, поэтому подобрать значения параметров k_4 и K_{\max} возможно только экспериментируя на самом роботе.

Конструкция и мощность приводов позволяет роботу РБ-2 двигаться с максимальной линейной скоростью, равной ~ 130 см/сек. Для оценки величины безопасной скорости были проведены натурные эксперименты в операционной среде в условиях реальной городской квартиры в окружении людей. Эксперименты показали, что скорость v_{\max} не должна превышать 60 см/сек. Это ограничение определяется совокупностью факторов, в том числе динамическими характеристиками робота, задержками в системе управления и динамикой изменений в операционной среде.

Уже при скорости 60 см/сек системе управления необходимо принимать решение об экстренном торможении не позже чем за 1 секунду до столкновения. При этом тормозной путь робота составляет ~ 30 см. Характерная скорость изменений в среде соответствует средней скорости движения человека в помещении и равна ~ 100 см/сек. Максимальное расстояние до ближайшего препятствия в окрестности робота редко превышает 150 см. В экстренной ситуации, когда находящийся на расстоянии 150 см от идущего человека робот сближается с ним "лоб в лоб", то на скорости 60 см/сек робот будет иметь возможность затормозить, чтобы избежать столкновения.

В работе [8] показано, что параметр k_1 является отношением скорости изменения угла θ к скорости изменения расстояния r между текущим положением робота и целевой позицией. Чем больше k_1 , тем быстрее робот стремится набрать нужный угол θ . Параметр k_2 является характеристикой скорости изменения угла δ , причем чем больше k_2 , тем с большей скоростью будет меняться угол δ . Увеличение каждого из этих параметров приводит к увеличению кривизны траектории движения, и эта зависимость отражается на движении робота, что хорошо видно на рис. 7.

На этом рисунке изображены траектории движения робота из начального положения с координатами $\{x=0, y=0\}$ в точку $\{x=2 \text{ м}, y=2 \text{ м}\}$, являющуюся подцелью робота. Эти траектории получены на имитаторе. В процессе моделирования записывались все характеристики движения, в том числе и кривизна траектории. Для рассматриваемого алгоритма кривизна K

является основной характеристикой, определяющей в соответствии с формулами (3) и (4) линейную и угловую скорости движения. Чем больше кривизна траектории, тем больше угловая скорость движения и меньше линейная. Эксперименты на имитаторе показали, что чрезмерное увеличение кривизны приводит к общему замедлению движения и потере гладкости траектории робота. В результате, для системы управления роботом РБ-2 выбраны следующие параметры: $k_1=0.3$, $k_2=1$.

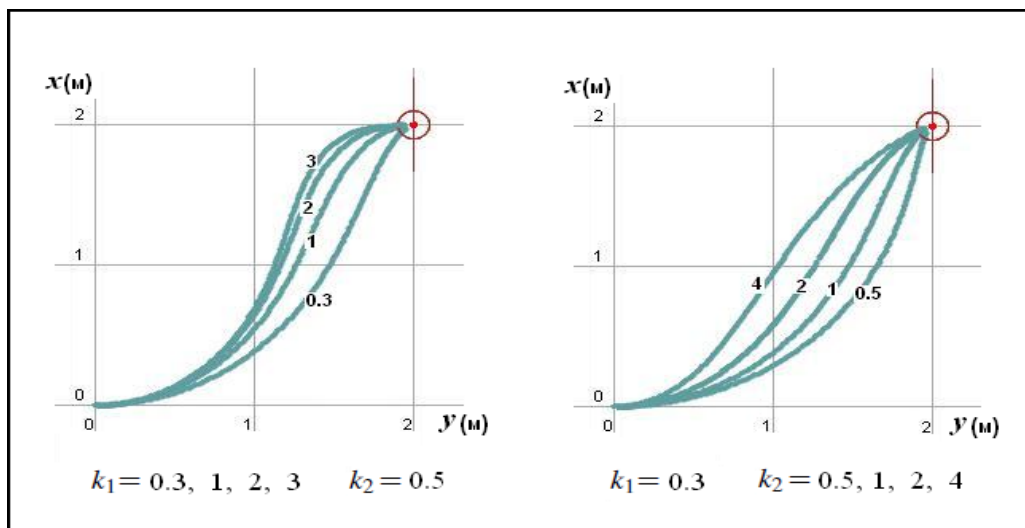


Рис. 7. Форма траектории в зависимости от параметров k_1 и k_2

Из формулы (4) видно, что параметр k_3 связывает максимально допустимую линейную скорость робота с его минимальной угловой скоростью, причем чем меньше k_3 при заданной текущей кривизне траектории K , тем больше минимальная угловая скорость. Значение параметра k_3 , по сути, определяет плавность движения робота, что особенно важно на сложном маршруте с большим количеством поворотов, коротких и длинных прямолинейных участков.

Для подбора параметра проводились специальные эксперименты на имитаторе, моделирующие движение робота по сложным маршрутам. Один из таких маршрутов, состоящий из 28 подцелей, представлен на рисунке 8. Маршрут начинается в точке с координатами $x=0$; $y=0$. Он проходит через серию коротких участков с поворотами длиной до 30 см, далее – через серию участков средней длины, до 1.5 м, как прямолинейных, так и с поворотами, и заканчивается длинным прямолинейным участком длиной почти в 2 м. Параметры движения, в том числе линейная и угловая скорости, регистрировались в процессе моделирования.

Эксперименты на имитаторе позволили определить значение параметра k_3 , при котором движение робота РБ-2 происходит без резких разгонов, торможений и больших угловых скоростей: $k_3 = 0.75$ см/град. При этом максимальная угловая скорость вращения равна ~ 40 град/сек, а средняя скорость движения по маршруту, представленному на рисунке 6, равна ~ 35 см/сек.

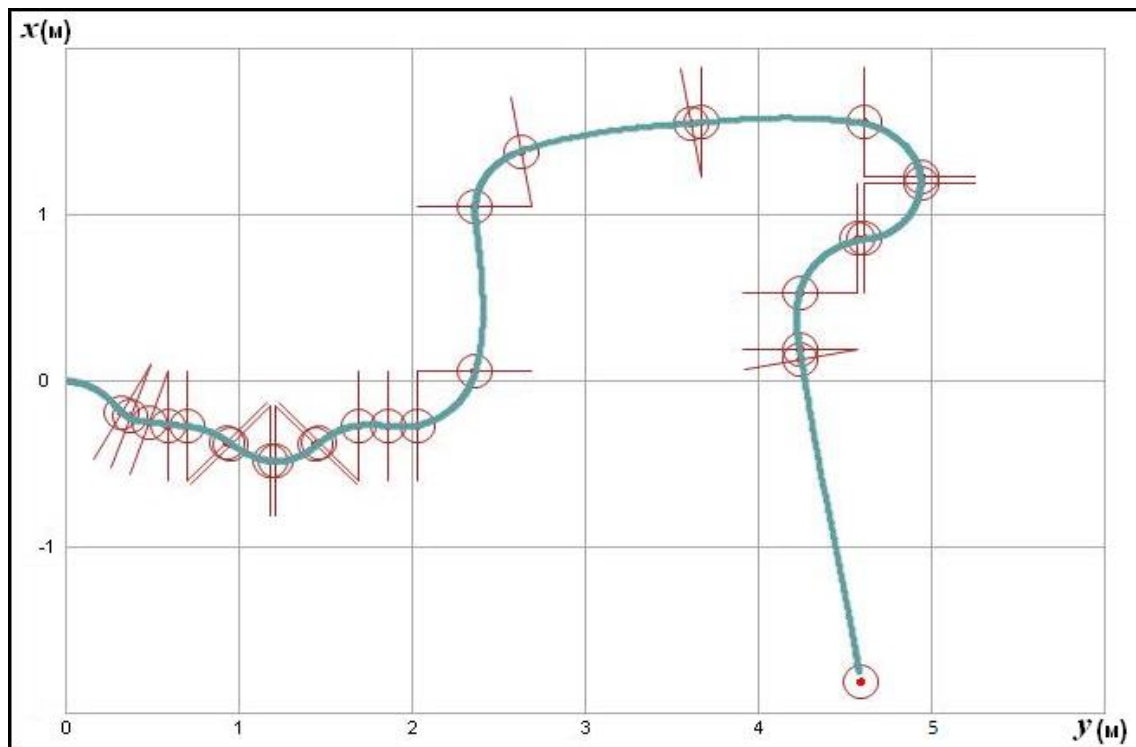


Рис. 8. Траектория движения, построенная на имитаторе

По значению параметра K_{\max} формируется условие перехода движения робота в режим поворота на месте, а параметр k_4 определяет угловую скорость робота при повороте на месте. Для выбора этих параметров проводились натурные эксперименты на роботе, движущемся по сложному маршруту. Маршрут включал в себя два резких поворота на угол 90 град на участке длиной в 80 см, соизмеримом с длиной самого робота, равной 60 см.

Параметры подбирались так, чтобы робот, с одной стороны, не проскакивал резкие повороты и, с другой стороны, не начинал поворачивать на месте на тех участках, которые возможно пройти с небольшой, но не нулевой линейной скоростью. В результате были выбраны следующие значения этих параметров: $K_{\max}=0.05 \text{ см}^{-1}$, $k_4=0.75 \text{ см/град}$. Эти параметры соответствуют минимальному радиусу поворота робота в движении, равному 20 см, и угловой скорости поворота на месте, равной 45 град/сек.

5. Результаты натурных экспериментов

Модель механико-электронной системы, заложенная в имитаторе, не учитывает момент инерции при вращении корпуса робота. Робот несет на себе аккумуляторы энергопитания, двигатели колес, бортовой компьютер и т.д. Масса робота составляет более 16 кг, центр тяжести робота смещен относительно его оси вращения. Это оказывает заметное влияние на инерционные характеристики корпуса робота и на характер его движения при поворотах ввиду малого бокового трения омни-колес.

Результаты натуральных экспериментов показали, что параметры, подобранные на имитаторе, должны быть скорректированы. При этом следует учитывать, что в начале поворота реальный робот в силу его большого момента инерции набирает угловую скорость заметно медленнее, чем имитатор. Процесс выхода из поворота и перехода в прямолинейное движение также заметно отличается от модели имитатора, построенной без учета особенностей бокового качения роликов омни-колес и проскальзывания ведущих колес робота. В реальном движении при резких поворотах робот как бы заносит – его вращение тормозится не эффективно.

С другой стороны, использование имитатора позволило оценить влияние каждого из параметров на траекторию движения, что сильно сократило время, затраченное на процесс подбора этих параметров при исследовании характеристик реального движения робота. По результатам натуральных экспериментов были выбраны новые параметры системы управления движителями: $k_1=1$, $k_2=3$, $k_3=0.3$ см/град. Траектория с такими параметрами характеризуется увеличенной угловой скоростью при входе робота в поворот и плавным снижением угловой скорости при выходе из поворота. Оказалось также, что параметры режима поворота на месте K_{\max} и k_4 подобраны на имитаторе достаточно хорошо и изменять их нет необходимости.

На рис. 9 представлена полученная траектория сложного движения робота РБ-2 со скорректированными параметрами описанного алгоритма построения нужного движения.

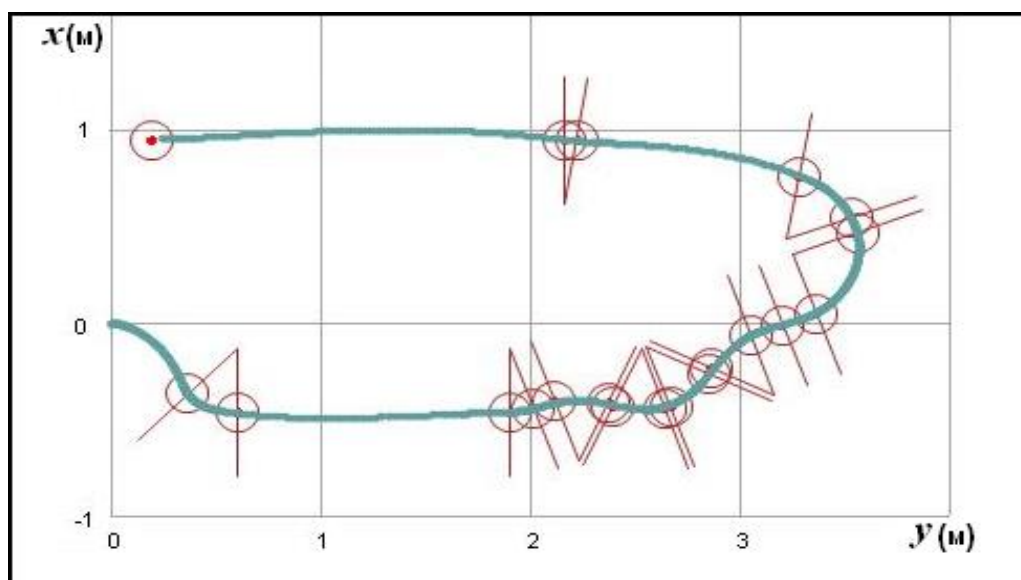


Рис. 9. Траектория движения реального робота

Маршрут включает в себя участки с резкими поворотами, короткие участки с небольшими поворотами и длинные прямолинейные участки. Из рисунка видно, что робот проходит предложенный маршрут плавно, без перегибов траектории, попадая с высокой точностью в створы проходов, которые и определяют маршрут движения. При этом отсутствуют и заносы корпуса робота, несмотря на легкое боковое качение его омни-колес.

6. Заключение

На базе анализа научно-технической литературы выбран простой и эффективный алгоритм управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2, и описано исследование способов настройки его параметров. Разработанная с этой целью программа-имитатор механико-электронной системы робота с достаточно высокой точностью описывает динамику движения робота. Проведенные эксперименты на таком имитаторе позволяют существенно сократить время и усилия по подбору настроечных параметров алгоритма управления дифференциальным приводом. Эксперименты на реальном роботе позволили завершить подбор параметров и, в целом, подтвердили эффективность данного подхода к решению задачи построения траектории движения робота с дифференциальным приводом.

Список литературы

1. Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot", Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Automat, Cincinnati, OH, 1990, pp. 384–389.L.
2. Ярошевский В.С. Согласованное управление движением колёс и корпуса полноприводного движителя. / В сб.: Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: МГУ, 2001, с. 70-77.
3. Буданов В.М., Девянин Е.А. О движении колёсных роботов. Прикладная математика и механика. Т. 67, вып. 2. 2003 г.
4. Ярошевский В.С. Проблемы согласования управления колёсами трёхколёсного робота с шестью степенями подвижности. / В сб.: Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: МГУ, 2004, с. 19-21.
5. Павловский В.Е., Евграфов В.В. Синтез D^2 - гладких траекторий для мобильного робота с дифференциальным приводом. / В сб.: Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: МГУ, 2004, с. 150-158.
6. Lapiere, D. Soetanto, and A. Pascoal, Nonsingular path following control of a unicycle in the presence of parametric modeling uncertainties // International Journal of Robust Nonlinear Control, 2006, pp. 485–503.
7. W.-J. Evers, H. Nijmeijer, Practical stabilization of a mobile robot using saturated control // Proc. IEEE Int. Conf. Dec. Control, San Diego, CA, 2006, pp. 2394–2399.
8. S. Gulati and B. Kuipers, High performance control for graceful motion of an intelligent wheelchair // Proc. 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA, May 2008), pp. 3932–3938.
9. Евграфов В.В., Павловский В.Е., Павловский В.В. Динамика, управление, моделирование роботов с дифференциальным приводом // Известия РАН. Теория и системы управления, № 5, 2007, с. 171-176.
10. Канатников А.Н., Касаткина Т.С. Особенности перехода к путевым координатам в задаче путевой стабилизации // Наука и образование: электронное научное издание. 2012. №07 [Электронный ресурс]. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/445496.html>