

УДК 00

Задача оптимизации системы автоматического управления: определение предельных режимов движения мобильного робота

10, сентябрь 2012

Чистяков М.Г.

Научный руководитель: Юдин А.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ4, Москва, Россия

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Введение

Задача построения достаточно простой и при этом адекватной модели движения в задачах автоматизированного или автоматического механического (физического) перемещения объектов является интересной и актуальной задачей не только с точки зрения обучения студентов, но и с точки зрения современной промышленности и науки.

Джордж Бокс, известный британский статистик, внесший заметный вклад в такие области как контроль качества, анализ временных рядов и Байесовский вывод, писал о моделях следующее: «В сущности, все модели не правильные ... но некоторые полезны...». Модели действительно могут быть очень сложны, но, в сущности, задача инженера сводится к правильному использованию только тех параметров модели, которые действительно важны для решения поставленной задачи. И если взять задачу движения (или навигации) мобильного робота в соревнованиях Евробот [1], которая достаточно сложна и во многом повторяет постановку более сложных и современных задач движения автономных автомобилей [2], то мы увидим, что робот обладает практически бесконечным набором параметров, которые можно учитывать в модели движения.

Например, научный интерес имеет рассмотрение влияния деформируемости колес на динамику робота [3]. Предлагаемая авторами модель деформируемого колеса позволяет строить более точное управление транспортным средством, но общее количество параметров, которые участвуют в формировании управления, значительно вырастает в сравнении с традиционным рассмотрением моделей с твердыми и недеформируемыми колесами. Кроме того, необходимо учитывать ряд ограничений, которые могут возникнуть при аппаратной реализации подобной системы управления: скоростные ограничения на вращение колеса (одна из моделей, рассматриваемая авторами, имеет ограничение на скорость движения транспортного средства порядка 120 км/ч, после которого модель перестает давать точные результаты), принципиальная невозможность на данном уровне техники померить необходимые для модели величины деформаций колеса и, наконец, слишком большое количество параметров, которое не позволяет строить управление в реальном времени.

Вследствие вышесказанного, разработка систем управления движением мобильными роботами является в некотором смысле искусством, когда точность модели необходимо сопрячь с возможностями аппаратной части (т.е., по Боксу, сделать модель «полезной»).

Данная статья является продолжением работы авторов, начатой в [4] и посвященной формированию траекторий движения мобильного робота. В этой статье делается попытка дополнить уже полученные результаты анализом предельных режимов движения мобильного робота с учетом его механических особенностей. В будущем это позволит построить модель оптимальной (достаточно простой) системы автоматического управления движением для мобильных роботов в соревнованиях Евробот.

Постановка задачи

В соревновании, как и в жизни, любое перемещение робота желательно выполнять быстро и точно. Для этого любое перемещение необходимо совершать на высоких скоростях. При таком движении возникает вероятность допустить ошибку позиционирования или нарушения траектории. В результате чего возникает противоречие: возможно либо быстрое передвижение, при котором траектория сохраняется слабо, либо сохранение траектории при малой скорости движения, а значит с большей затратой времени, что в некоторых случаях просто недопустимо. Поэтому необходимо найти оптимальное соотношение между временем, затраченным на прохождение поворота, и точностью соблюдения траектории поворота.

Далее устойчивостью будем называть способность робота сохранять заданную скорость и направление движения под действием возмущающих воздействий и ошибок измерения.

Таким образом, задача статьи сводится к выявлению оптимальной скорости прохождения поворота роботом и составление аналитического выражения для её вычисления.

Для выявления проблемных мест на траектории рассмотрим один из типовых режимов движения на примере вариантов движений в соревнованиях Евробот. На рисунке 1 показаны два типа основных движений.

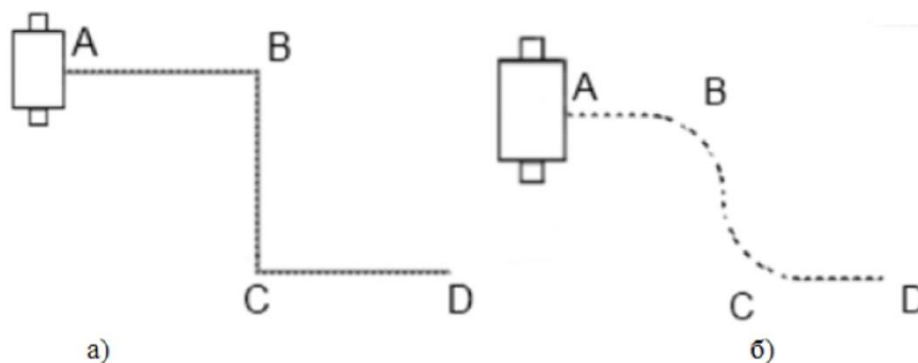


Рис. 1 - Возможные траектории изменения движения

В обоих случаях роботу необходимо проехать из точки А через точки В и С в точку D, где ему нужно остановиться. При этом возможны два случая исполнения данного действия. В первом случае (рис. 1а) робот доезжает до точки В, останавливается, после чего разворачивается и едет в точку С, где совершает аналогичные действия и перемещается в точку D, в которой ему необходимо остановиться. В данном случае накапливается ошибка при каждом торможении. Она возникает из-за дискретности датчиков оборотов колес, так как при торможении колесо не полностью совершает оборот. Во втором случае (рис. 1б) поворот в точках В и С происходит на скорости. При этом исключается ошибка, возникающая при торможении в т. В и С, но возникает возможность ошибки из-за заноса робота, т.к. поворот выполняется на скорости. Причем при движении с увеличением скорости робота скорость прохождения поворота растет, что ведет к большому различию между задаваемой траекторией и реальной.

Необходимо определить максимальную скорость движения в каждый момент времени, при которой траектории бы различались на допустимую погрешность (ошибку).

Для решения данной задачи рассмотрим двухколесный робот 3 (рис.2) с расстоянием между колесами 1,2 L и центром масс, находящимся на оси симметрии и расположенным на высоте h_c , который поворачивает без снижения скорости с радиусом поворота R.

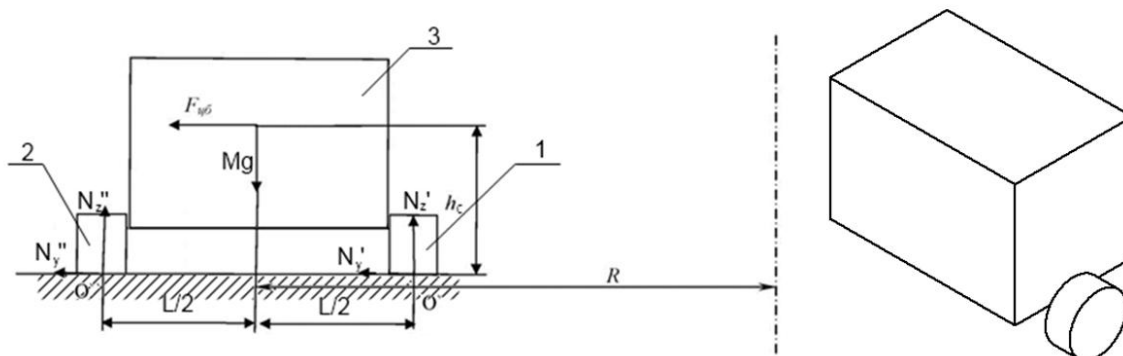


Рис. 2 – Силы, действующие на робот при повороте (вид спереди)

На него действуют в этот момент следующие силы: $F_{цб}$ - центробежная сила, которая стремится «вытолкнуть» из поворота робота, N'_y и N''_y - поперечных реакции колес, N'_z и N''_z - продольные реакции колес, Mg - вес всей конструкции робота.

Занос робота

Занос возникает при начале скольжения колеса перпендикулярно направлению движения. Это происходит, если центробежная сила равна сумме поперечных реакций колес (1):

$$F_{цб} = N'_y + N''_y. \quad (1)$$

С другой стороны, центробежная сила также равна (2):

$$F_{цб} = M \cdot \frac{V^2}{R}, \quad (2)$$

где V- скорость центра масс робота (рис. 2), она равна (3):

$$V = \frac{V'' + V'}{2}. \quad (3)$$

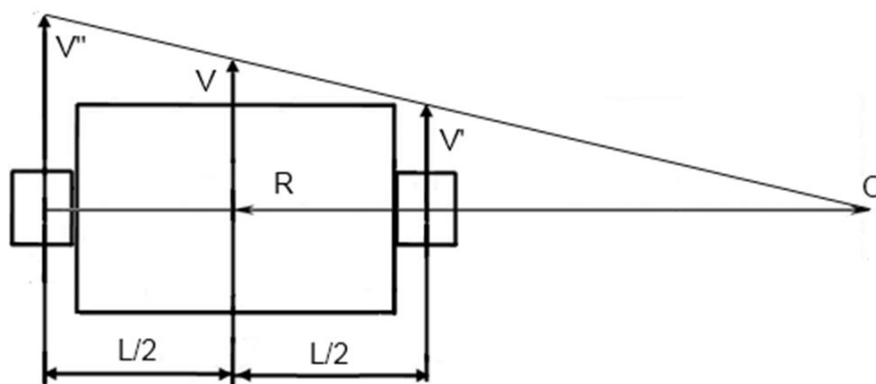


Рис. 3 - Скорости точек робота при повороте (вид сверху)

При этом V' и V'' соответственно линейные скорости колеса, равны (4) и (5):

$$V' = \omega \cdot R', \quad (4)$$

$$V'' = \omega \cdot R'' = \omega \cdot (R' + L). \quad (5)$$

Выразим параметры поворота (угловую скорость ω и радиус R) через линейные скорости V'' и V' (рис. 3). Тогда угловая скорость поворота равна (6):

$$\omega = \frac{V'' - V'}{L}. \quad (6)$$

Радиус поворота определяется как (7):

$$R = \frac{L}{2} \cdot \frac{V'' + V'}{V'' - V'}. \quad (7)$$

Также известно, что поперечные реакции колес равны соответственно (8) и (9):

$$N'_y = N'_z \cdot \varphi_y \quad (8) \quad \text{и} \quad N''_y = N''_z \cdot \varphi_y \quad (9),$$

где φ_y - коэффициент поперечного сцепления колеса с поверхностью. Он показывает зависимость перераспределения нагрузки по колесу при движении в повороте. Этот коэффициент зависит от материала и конструкции колеса, поверхности (конструкции, состояния), скорости. На сухой поверхности φ_y обычно в пределах от 0,45 до 0,75.

Сумма вертикальных реакций равна весу робота (10):

$$N'_z + N''_z = Mg. \quad (10)$$

Подставляя выражения (8) и (9) в (10):

$$N'_y + N''_y = (N'_z + N''_z) \cdot \varphi_y = Mg \cdot \varphi_y. \quad (11)$$

Учитывая выражение (1), (2) и (12) получим:

$$M \cdot \frac{V^2}{R} = Mg \cdot \varphi_y. \quad (12)$$

Откуда следует, что критическая скорость заноса равна (13):

$$V_{\text{критическая}}^{\text{занос}} = \sqrt{\varphi_y \cdot g \cdot R}. \quad (13)$$

Подставив в уравнение (13) соотношения (3) и (7), после преобразования получим (14):

$$V''^2 - V'^2 = \varphi_y \cdot g. \quad (14)$$

Из последнего выражения (14) следует, что заноса не будет при выполнении условия (15):

$$V''^2 - V'^2 \leq \varphi_y \cdot g. \quad (15)$$

Из этого следует, что при задании угла поворота через разницу скоростей колес (7) необходимо всегда проверять подобранные скорости на критерий заноса (15).

Опрокидывание робота на бок при повороте

Известно, что условие опрокидывания робота: $N'_z = 0$, при постоянной угловой скорости поворота $\omega = \text{const}$.

Для этого сумма моментов относительно O'' должна быть равна нулю:

$$N'_z \cdot L + M \cdot \frac{V^2}{R} \cdot h_c - Mg \cdot \frac{L}{2} = 0, \quad (16)$$

откуда вертикальная реакция равна (17)

$$N'_z = \frac{Mg}{L} \left(\frac{L}{2} - \frac{V^2}{g \cdot R} \cdot h_c \right) = 0. \quad (17)$$

Из этого (17) следует:

$$\frac{L}{2} = \frac{V^2}{g \cdot R} \cdot h_c. \quad (18)$$

Перегруппировав (18), получим:

$$\frac{g \cdot L}{2 \cdot h_c} = \left(\frac{V^2}{R} \right)_{\text{опр}}. \quad (19)$$

Откуда критическая скорость опрокидывания равна (20):

$$V_{\text{критическая}}^{\text{опрокидывания}} = \sqrt{\frac{g \cdot L \cdot R}{2 \cdot h_c}}. \quad (20)$$

Для того чтобы робот не переворачивался, необходимо выполнить условие (21):

$$\left(\frac{V^2}{R} \right)_{\text{опр}} > \left(\frac{V^2}{R} \right)_{\text{занос}}, \quad (21)$$

откуда после подстановки (13) и (19) и после сокращения получается (22):

$$\frac{L}{2 \cdot h_c} > \varphi_y. \quad (22)$$

При анализе последнего выражения (22) следует отметить, что для того, чтобы робот не переворачивался, необходимо, чтобы центр масс робота находился как можно ниже и ближе к оси симметрии робота.

Предлагаемый типовой алгоритм оптимизации системы управления

На рис. 4 представлен пример алгоритма для выполнения проверки при движении робота. Алгоритм дает возможность при приближении к повороту подобрать оптимальную скорость его прохождения. Для этого на начальной стадии в зависимости от профиля колес и состояния поверхности движения выбирается коэффициент бокового сцепления колеса с поверхностью φ . Далее происходит получение основных параметров поворота: радиуса R и угловой скорости ω . После чего происходит расчёт линейных радиальных скоростей колес, которые потом проверяются по условию. Если они не удовлетворяют условию, то необходимо снизить заданную угловую скорость поворота.

Рассмотрим расчет по заданному алгоритму. Возьмём для примера габариты робота с шириной $L=0.3\text{ м}$ и коэффициентом сцепления $\varphi = 0.6$. Для поворота необходима угловая скорость $\omega = 6,6 \frac{1}{\text{с}}$ и радиус поворота $R=0,3 \text{ м}$. Согласно этому линейные скорости колес равны соответственно $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; проверяя соотношение (15) получаем, что $8 \leq 6$ - неверно. Поэтому необходимо изменение характеристик поворота: угловая скорость $\omega = 3,3 \frac{1}{\text{с}}$ и радиус поворота $R=0,45 \text{ м}$. Из этого следует, что линейные скорости колес равны $2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Повторно проверяем условие и получаем, что $3 \leq 6$ - верно. Из чего следует, что при данных скоростях можно совершить поворот без заноса.



Рис. 4 – Алгоритм для реализации расчётов

Выводы

Для того чтобы робот меньше уходил в занос, возможно несколько механизмов, например, выбор профиля колеса оптимальной толщины и конструкции или снижение заноса за счет наклона колес. Оба этих метода ведут к увеличению коэффициента поперечного сцепления колеса с поверхностью, но усложняют конструкцию, поэтому их применение целесообразно при требованиях большой точности. Соотношение (22) необходимо для выбора оптимальной конструкции мобильного робота и его колес. Полученные в результате формулы (13), (15) необходимы для проверки каждой точки траектории при различных контролируемых параметрах и для предотвращения заноса. Их целесообразно использовать для корректировки уже полученной траектории и скорости движения, для определения мест возможных заносов.

Проведенные расчеты позволяют снизить время передвижения за счет использования максимальных допустимых скоростей при повороте. Данные соотношения необходимы для построения оптимальной траектории движения мобильного робота. В будущем авторы планируют продолжить работу в сторону построения единой модели оптимальной (достаточно простой) системы автоматического управления движением, учитывающей специфику мобильных роботов соревнований Евробот.

Литература

1. Молодежные соревнования мобильных автономных роботов Евробот. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.eurobot.org>, <http://www.eurobot-russia.ru> — Проверено 31.01.2012.
2. John Markoff Google Cars Drive Themselves, in Traffic, The New York Times, Oct 10, 2010
3. А. Я. Красинский, Д.Р.Каюмова О влиянии деформируемости колес на динамику робота с дифференциальным приводом // Нелинейная динамика. 2011. Т. 7. № 4 (Мобильные роботы). С. 803–822. Полнотекстовая версия в свободном доступе: <http://nd.ics.org.ru>
4. Чистяков М.Г., Юдин А.В. Расчет траектории мобильного робота в частной задаче перемещения объектов // Сборник научных трудов. 13-ая Молодежная научно-техническая конференция "Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011". - Москва. 27-28 апреля 2011 г.- С.310-313
5. А. Ш. Хусаинов, В. В. Селифонов / Теория автомобиля. Конспект лекций — Ульяновск: УлГТУ, 2008. — 121 с.
6. А.В. Чигарев, Ю.В. Чигарев. / Курс теоретической механики : учеб. пособие — Минск: Новое знание ; М.: ЦУПЛ, 2010. — 399 с.

7. А.Е.Аверьянихин, А.И.Власов, Л.В.Журавлева, и др. / Применение положений технического регламента для оформления конструкторско-технологической документации при выполнении домашних заданий, курсовых работ и проектов - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 53 с.