

АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ В ПОМЕЩЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ ДАТЧИКОВ

Д.В. Хаблов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: dkhablov@mail.ru

Ключевые слова: мобильный робот, дифференциальный привод, генератор маршрута, бинарная карта, одометр, эффект Доплера для радиоволн, фильтр Калмана.

Аннотация: В работе описана система управления грузовыми двух и четырехколесными роботами, способными перемещаться в помещениях в автономном режиме без использования сигналов спутниковой навигации. Система управления включает в себя создание бинарной сетевой карты с массивом вероятностных путевых точек, вычисление оптимального пути робота от стартовой и финишной путевой точки, контроллер следования по маршруту. Алгоритм управления при постоянной скорости использует регулирующий параметр – разность и сумму крутящих моментов правого и левого ведущих колес дифференциального привода. При этом в обратную связь включен фильтр Калмана с измерением линейной скорости микроволновыми датчиками и одометры, измеряющие скорости вращения колес.

1. Введение

Мобильным роботом (МР) принято называть беспилотное транспортное средство (ТС), управляемое дистанционно или автономно, выполняющее при этом какие либо полезные действия, от перемещения грузов до наблюдения за окружающей средой, рекламных или маркетинговых акций. Для любых беспилотных ТС, как правило, необходима внешняя навигация или, при работе в автономном режиме, некие системы технического зрения (например, лидар, видеомонитор) с элементами искусственного интеллекта. Однако зона действия МР ограничена помещениями и другими областями, где невозможно использовать сигналы спутниковой глобальной навигации вследствие их ослабления или неустойчивого приема [1]. С другой стороны, поскольку МР предназначены для выполнения рутинных операций в зонах с оцифрованной картой, применение дорогостоящих систем управления в большинстве случаев не является оправданным.

В работе ставится задача создания системы управления двухколесного мобильного робота с дифференциальным электрическим приводом [2], но обеспечивающая реально автономный режим управления. При этом необходим комплексный подход с созданием и вводом цифровой бинарной сетевой карты в систему управления, расчетом оптимального маршрута. Алгоритм следования по траектории, должен поддерживать заданный курс прямолинейного движения между путевыми точками и установки требуемого угла поворота при смене ориентации между ними. Для решения этой задачи предлагается использовать СВЧ датчики [3], измеряющие реальные линейные скорости

колес. Их данные должны быть встроены в систему для коррекции сигналов, управляющих движением, желательно с использованием фильтра Калмана [4].

2. Модель мобильного робота с дифференциальным приводом

Динамическую модель робота рассмотрим на примере двухколесной дифференциальной схеме, кинематическая схема которой представлена на рис. 1. Рассматриваемый робот оснащен двумя колесами, имеющими одну степень свободы с собственным дифференциальным приводом и третьей точкой опоры для контакта. Робот может менять свое направление, изменяя относительную скорость вращения своих колес, не требует дополнительного рулевого управления и обладает высокой маневренностью. Из соотношения между линейными скоростями и скоростями вращения правого и левого колес робота V_R и V_L и ω_r и ω_l , можно записать:

$$(1) \quad V_R = r\omega_r, V_L = r\omega_l,$$

где r – радиус колес. Если W – расстояние между колесами, то линейная V и угловая Ω скорость робота в точке P , расположенной посередине между колесами, выражается через уравнения:

$$(2) \quad V = (V_R + V_L)/2, \Omega = (V_R - V_L)/W.$$

Кинематическую модель робота, описывающую перемещение из точки $P = [x_P, y_P, \theta_P]^T$ запишем в матричном виде:

$$(3) \quad \begin{bmatrix} \dot{x}_P \\ \dot{y}_P \\ \dot{\theta}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Omega \end{bmatrix},$$

где $\theta_i = \arctg[(y_{i+1} - y_i)/(x_{i+1} - x_i)]$ – направление движения или ориентация МР к следующей путевой точке (см. рис. 1).

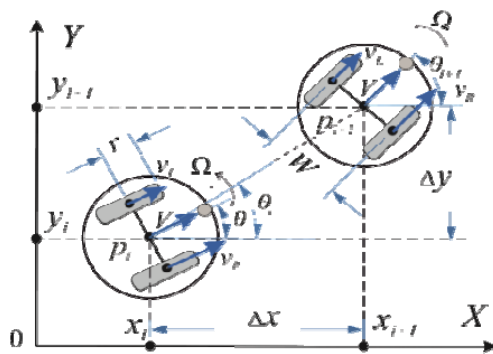


Рис. 1. Кинематическая модель двухколесного мобильного робота.

Если представить, что каждое колесо привода вращается от своего двигателя постоянного тока с индуктивностями $L_{L,R}$ с сопротивлениями $R_{L,R}$ и моментами $J_{L,R}$, то их скорости вращения от передачи моментов электродвигателей при управляющих напряжениях $U_{L,R}$ определятся из уравнений в виде отношений изображений из преобразования Лапласа выхода и входа:

$$(4) \quad G_{L,R}(s) = \omega_{L,R}(s)/U_{L,R} = K_m / [(L_{L,R}s + R_{L,R})(J_{L,R}s + K_f) + K_m K_b],$$

где K_m – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя, K_b – константа ЭДС, K_f – линейная аппроксимация коэффициента для вязкого трения [2].

Из анализа формул (1), (2) и (3) видно, что для устойчивого движения робота по заданному маршруту в автономном режиме надо как минимум обеспечить соответствие управляющих напряжений U_L и U_R для моторов левого и правого колеса реальному

вектору скорости (2). Однако это не получается без контроля скорости из-за непостоянной массы робота, влияющей на момент инерции, из-за коэффициентов трения и сопротивления, зависящих от свойств поверхности и других условий эксплуатации (3). Измерение с помощью отдельных одометров колес также приносит ошибку из-за периодического скольжения колес, изменений в их радиусе из-за давления в шинах. Отсюда следует необходимость прямого измерения вектора скорости (2) через измерение угловых $\omega_{L,R}$ или линейных скоростей колес $v_{L,R}$ и последующим вычислением текущих координат. Наилучшие результаты может принести одновременное независимое измерение угловых и линейных скоростей с применением фильтра Калмана.

3. Прямое измерение линейных скоростей колес

Поскольку измерение скорости колес одометрами не учитывают эффекта проскальзывания и изменений в коэффициенте сцепления колес с поверхностью, наиболее подходящими способами прямого измерения линейных скоростей является использование датчиков на основе эффекта Доплера для электромагнитных волн. В них используется непрерывное излучение радиоволн СВЧ диапазона. Приемо-передающая антенна излучает вперед и под углом α к направлению поступательного движения колеса в вертикальной плоскости СВЧ волны с частотой f_0 . Отраженные от поверхности дороги СВЧ волны принимаются этой же антенной. Затем они смешиваются в смесителе с частью излучаемых волн, в результате чего выделяется доплеровский сигнал с частотой f . Эта частота будет пропорциональна линейной скорости колеса v :

$$(5) \quad f = 2v \cos(\alpha) / \lambda_0,$$

где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны электромагнитных колебаний, c – скорость света.

После подстановки значения скоростей через частоты f_R и f_L для правого и левого колеса из (5) в формулы (2) и (3) получим выражение для линейной и угловой скорости МР:

$$(6) \quad V = \lambda_0(f_L + f_R) / 4 \cos(\alpha), \quad \Omega = \lambda_0(f_L - f_R) / 2W \cos(\alpha).$$

С учетом (6) получим выражение кинематической модели через доплеровские частоты:

$$(7) \quad \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} = \frac{\lambda_0}{2 \cos \alpha} \begin{bmatrix} \cos \theta / 2 & \cos \theta / 2 \\ \sin \theta / 2 & \sin \theta / 2 \\ 1/W & -1/W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_R \\ f_L \end{bmatrix}.$$

В нашем конкретном случае применяем фильтр Кальмана, где используем в качестве управляющего воздействия угловые скорости вращения колес ω_L и ω_R , измеряемые одометрами, которые затем пересчитываются в линейные скорости после умножения на радиус r (1). Для измерения используем значения линейных скоростей колес v_L и v_R от доплеровских микроволновых датчиков по формулам (6). Фильтр Калмана обеспечивает оптимальную сходимость благодаря рекурсивному принципу действия с постоянным уточнением результатов измерения на основе уже накопленной информации.

4. Система автономного управления мобильным роботом

Задача системы управления роботом заключается в генерировании сигналов для самостоятельного движения по заданному маршруту. Маршрут задается массивом опорных точек $p_r = [x_r, y_r, t_r]$ от 0 до N_r , куда входят декартовы координаты каждой i -ой точки и углом ориентации на следующую $i + 1$ -ую точку, за исключением последней. Между опорными точками применим интерполяцию $N_r = \text{int}(T_{\text{end}}/T_S)$ и получим массив точек $\{x_r(t_k), y_r(t_k), t_r(t_k)\}$, $t_k = kT_S, \forall k = 0: N_r$. Кинематическое уравнение с мгновенными значениями линейных скоростей и ориентациями запишем как:

$$\dot{p}_r = \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & 0 \\ \sin\theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ \Omega_r \end{bmatrix}, V_r(t_k) = \sqrt{\frac{x_r(t_k) - x_r(t_{k-1})}{T_S} + \frac{y_r(t_k) - y_r(t_{k-1})}{T_S}},$$

$$\theta_r(t_k) = \arctg\left(\frac{y_r(t_k) - y_r(t_{k-1})}{x_r(t_k) - x_r(t_{k-1})}\right)$$

Угловую мгновенную скорость можно вычислить как:

$$\Omega_r(t_r) = [\theta_r(t_k) - \theta_r(t_{k-1})]/T_S.$$

Принцип работы алгоритма следования по маршруту p_k заключается в следующих шагах.

1. Установка робота в начальную стартовую точку, задание маршрута, постоянной скорости робота V_r , время такта T_S , начало движения, определение текущих координат $[x, y, \theta]^T$ после интегрирования (1) и обработки фильтром Калмана.
2. Определение на каждом такте текущей ошибки расположения относительно опорных значений и ее производной, после подстановки значения соответствующих угловых и линейных скоростей:

$$(8) \quad \dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega y_e - V + V_r \cos\theta_e \\ -\Omega x_e + V_r \sin\theta_e \\ \Omega_r - \Omega \end{bmatrix}.$$

3. Поскольку в случае линейной модели, уравнение (8) минимизируется в окрестности точки равновесия $e \approx 0$, $\sin\theta_e \approx 0$, входные данные для управления из (8) представим следующим образом:

$$(9) \quad u_e = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r \cos\theta_e - V \\ \Omega_r - \Omega \end{bmatrix}.$$

4. Подставляя (9) в (3), кинематическую модель ошибки положения можно представить как

$$(10) \quad \dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega_r & 0 \\ -\Omega_r & 0 & V_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} p_e + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u_e.$$

5. Управляющие входы u_e в кинематической модели (10) разделяем на прямую передачу u_d и обратную связь u_b :

$$u_e = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r \cos\theta_e \\ \Omega_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V \\ \Omega \end{bmatrix} = u_d - u_b.$$

На основе формулы (10) строится управляющая система мобильного робота с применением линейного фильтра Калмана (KF) в обратной связи, представленная на рис. 2. Сигнал непосредственного управления двигателями мобильного робота u_b преобразуется во входные напряжения и соответственно моменты, подаваемые на левый и правый двигатель, управляющий колесами в соответствии с (2), (3) и (4):

$$u_b = \begin{bmatrix} (\omega_R + \omega_L)/2 \\ (\omega_R - \omega_L)/W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (G_R U_R + G_L U_L)/2 \\ (G_R U_R - G_L U_L)/W \end{bmatrix}.$$

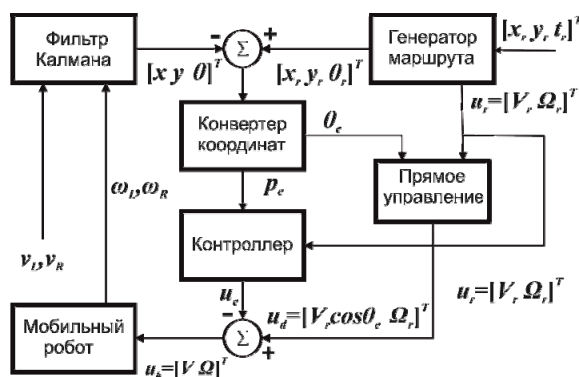


Рис. 2. Система управления мобильным роботом с Фильтром Калмана в обратной связи.

4. Заключение

Для успешного функционирования системы управления необходимо подготовить точную бинарную сеточную карту помещений в области работы МР. На карте обозначаются разрешенные и запрещенные области для передвижения робота. Затем вычисляется оптимальный маршрут из опорных путевых точек, между стартовой и конечной точкой, с учетом размеров МР с предустановленным запасом.

Результаты моделирования системы управления, благодаря комплексному подходу, показали высокую степень адаптации к разным планировкам помещений, от выбора оптимального маршрута до перемещения в обозначенном коридоре без столкновения со стенами и другими препятствиями. Применение линейного фильтра Калмана при использовании СВЧ датчиков скорости колес совместно с одометрами позволило добиться сохранения приемлемой точности перемещения при ограниченном пути в несколько десятков метров на плоской поверхности. При этом не исключается добавления простейшего локального позиционирования с помощью лазерного дальномера или видеомонитора с подключением по дополнительному измерительному входу фильтра Калмана.

Список литературы

1. Dardari D., Fallettiis E., Marco L., and, Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques. A signal processing perspective. Amsterdam: Elsevier, 2011. 432 p.
2. Do Khac Tiep, Kinam Lee, Dae-Yeong Im, Bongwook Kwak, Young-Jae Ryoo. Design of Fuzzy-PID Controller for Path Tracking of Mobile Robot with Differential Drive // International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. 2018. Vol. 18, No. 3. P. 220-228.
3. Khablov D.V. Autonomous navigation system of ground transport based on Doppler sensors for measuring vector velocity // Measurement Techniques. 2018. Vol. 61, No. 4. P. 384-389.
4. Larsen T.D, Hansen K.L., Andersen N.A., Ravn O. Design of Kalman Filters for Mobile Robots; Evaluation of the Kinematic and Odometric Approach // Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications. Hawaii, USA, 1999. P. 22-27.