

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 681.53

### КОРРЕКЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Ю. Н. Золотухин, К. Ю. Котов, А. С. Мальцев, А. А. Нестеров,  
М. Н. Филиппов, А. П. Ян

*Учреждение Российской академии наук  
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su*

Рассмотрено влияние транспортного запаздывания и классические способы его коррекции в системе управления мобильным роботом с дифференциальным приводом. Показано, что наличие таких эффектов, как проскальзывание колёс, неровности поверхности при перемещении робота, ограничивает область применения традиционных алгоритмов коррекции запаздывания. Предложен способ коррекции запаздывания, основанный на использовании аналитической экстраполяции и расширенного фильтра Калмана. Результаты экспериментов подтверждают эффективность предложенного подхода.

*Ключевые слова:* мобильный робот e-puck, траекторное движение, транспортное запаздывание.

**Введение.** В последнее время наблюдается бурное развитие сети Интернет, беспроводных сетей, систем GPS-навигации и автономных и телеуправляемых систем, таких как системы подвижных роботов [1, 2], манипуляторов [3] и т. п. В связи с этим значительный интерес проявляется к системам управления с запаздыванием, в которых источником запаздывания является канал передачи данных от датчика к системе управления или от системы управления к объекту [4, 5], а также непосредственно датчики сигналов [6].

В данной работе рассмотрено влияние транспортного запаздывания и классические способы его коррекции в системе управления мобильным роботом с дифференциальным приводом. Предложен способ коррекции запаздывания, основанный на использовании аналитической экстраполяции и расширенного фильтра Калмана. Алгоритм управления движением робота построен на базе метода, изложенного в [7].

**1. Описание объекта управления и постановка задачи.** В качестве объекта управления используется мобильный робот e-puck с дифференциальным приводом, разработанный в Государственном политехническом университете г. Лозанны (Швейцария) и предназначенный для исследовательских и образовательных целей [8]. Двухколёсный робот представляет собой платформу с независимыми приводами колёс, где каждый привод состоит из пары шаговый двигатель—редуктор и обеспечивает дискретность 1000 шагов на один полный оборот колеса. Роль третьей опоры играет один из закруглённых краёв платформы. Робот оснащён микроконтроллером и сигнальным процессором, позволяющими вести обработку информации, получаемой от различных датчиков: видеокамеры, инфракрасных датчиков дальности, датчика ускорения, микрофонов для локализации источника звука, и выдавать управляющие команды на исполнительные устройства: приводы колёс, светодиоды и динамик для светозвуковой коммуникации и индикации состояния. Платформа робота имеет диаметр 75 мм и высоту, зависящую от набора дополнитель-

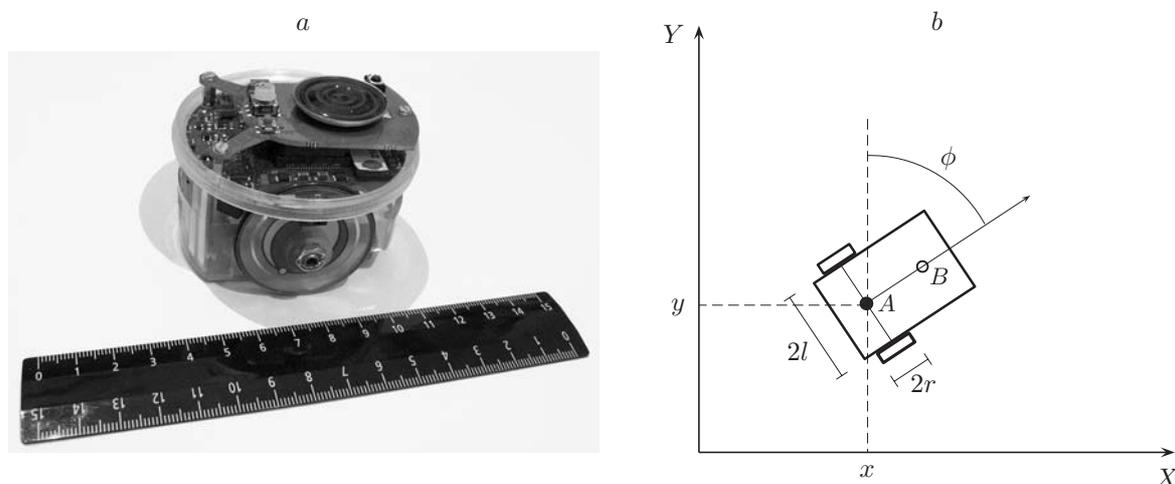


Рис. 1

ных устройств (рис. 1, а). Коммуникация робота с внешним компьютером может осуществляться посредством беспроводной связи (Bluetooth) или через проводное соединение (RS232). Для проверки эффективности предложенного в работе [7] алгоритма управления группой мобильных роботов создан экспериментальный стенд, состоящий из горизонтального стола (поверхности движения роботов), видеосистемы для получения абсолютных координат роботов и компьютера, выполняющего функции обработки и передачи информации и управляющих команд роботам [9].

1.1. *Модель объекта.* Уравнения кинематического и упрощённого динамического описания робота имеют следующий вид [9]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \sin \phi, \\ \dot{y} = v \cos \phi, \\ \dot{\phi} = w, \\ v = \frac{1}{2a_0}(U_1 + U_2), \\ w = \frac{1}{2a_0 l}(U_1 - U_2), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x, y$  — координаты объекта на плоскости;  $v, w$  — линейная и угловая скорости объекта ( $0 \leq v \leq v_{\max}$ ,  $-w_{\max} \leq w \leq w_{\max}$ );  $\phi$  — угол, характеризующий направление движения объекта относительно оси ординат;  $a_0 = nc/r$  ( $n$  — передаточное число редуктора,  $c$  — коэффициент электромеханического взаимодействия,  $r$  — радиус колёс);  $l$  — половина расстояния между колёсами. Схематическое изображение робота с использованием принятых обозначений показано на рис. 1, б. Управляющими воздействиями являются сторонние ЭДС  $U_1, U_2$ , приложенные к электродвигателям,  $|U_{1,2}| \leq U_{\max}$ .

1.2. *Постановка задачи и алгоритм управления.* Для построения группы роботов использован подход «лидер—ведомые», где в составе группы выделен объект-лидер, относительно которого остальные члены группы (ведомые) определяют своё положение и за которым следуют.

Поставим перед лидером задачу выйти в точку с координатами  $(x_0(t), y_0(t))$  на некоторой кривой в плоскости  $XU$  с дальнейшим движением вдоль этой кривой. Направление

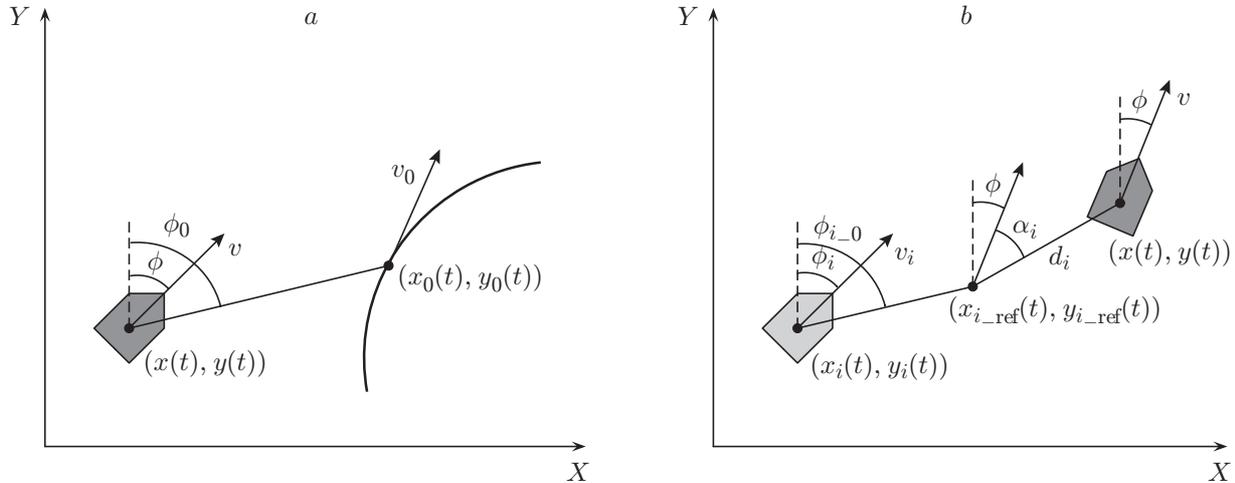


Рис. 2

на точку  $(x_0(t), y_0(t))$  определяется углом  $\phi_0(t)$ ,  $0 \leq \phi_0 \leq 2\pi$ . Схематическое изображение лидера относительно целевого положения показано на рис. 2, а.

Ошибка в положении лидера относительно точки  $(x_0(t), y_0(t))$  задана тремя величинами:

$$\begin{cases} \Delta x(t) = x(t) - x_0(t), \\ \Delta y(t) = y(t) - y_0(t), \\ \Delta \phi(t) = \phi(t) - \phi_0(t). \end{cases} \quad (2)$$

Уменьшение ошибок  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  достигается при организации вынужденного движения системы вдоль желаемой траектории в пространстве переменных  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $y$ ,  $\dot{y}$ ,  $\phi$ ,  $\dot{\phi}$ . Управляющие параметры  $F_a = U_1 + U_2$ ,  $F_b = U_1 - U_2$  определены следующим образом:

$$F_a = \begin{cases} c_1 u & \text{при } v > 0 \text{ или } u \geq 0, \\ 0 & \text{при } v = 0 \text{ и } u < 0, \\ 0 & \text{при } v > v_{\max} \text{ и } u > 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$F_b = \begin{cases} -c_2 S_3 & \text{при } -w_{\max} \leq w \leq w_{\max}, \\ 0 & \text{при } w > w_{\max} \text{ и } S_3 < 0, \\ 0 & \text{при } w < -w_{\max} \text{ и } S_3 > 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $u = -(S_1 \sin \phi + S_2 \cos \phi)$ ;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  — функции, определяющие отклонение объекта от желаемой траектории [7].

Задачей управления, аналогичной описанной выше, будем считать перевод объекта-ведомого в точку  $(x_{i\text{-ref}}, y_{i\text{-ref}})$  с дальнейшим отслеживанием траектории движения данной точки. Изображение ведомого относительно целевого положения в группе показано на рис. 2, б.

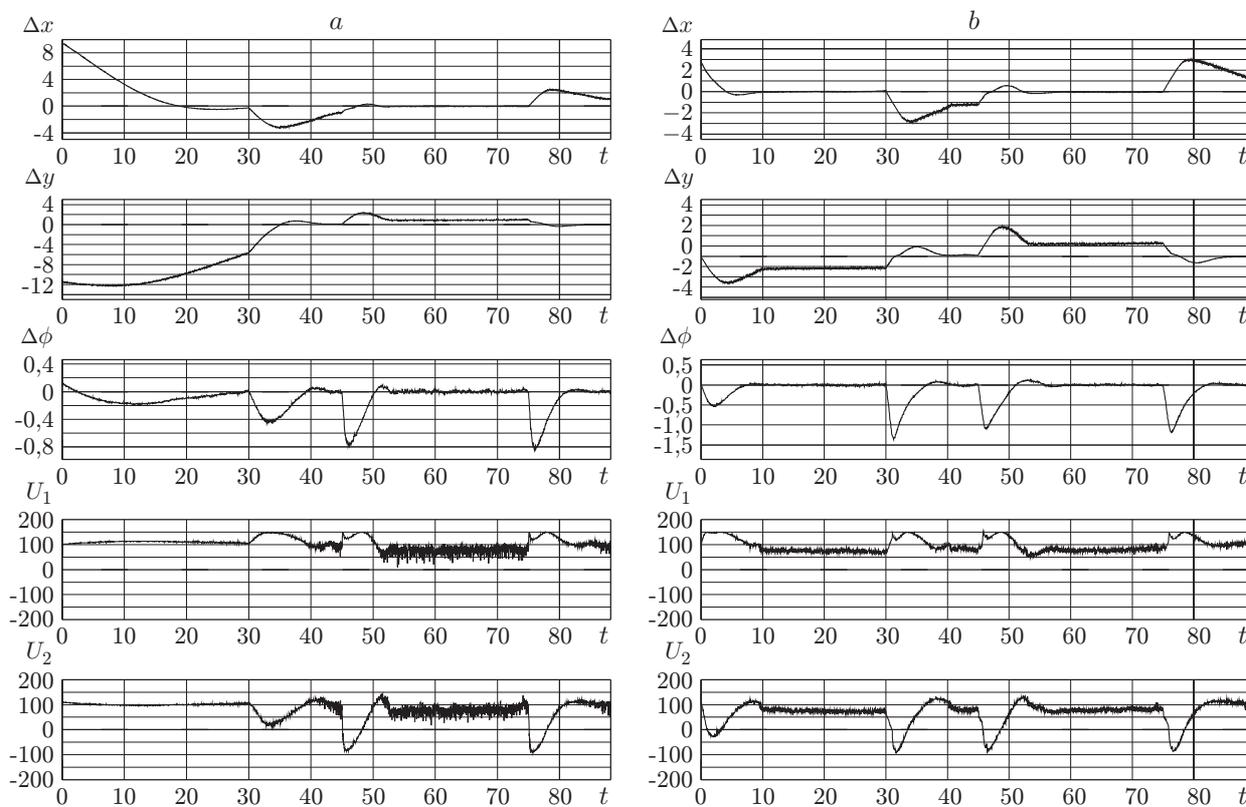


Рис. 3

**2. Управление в окрестности целевого положения.** При попадании объекта в малую окрестность целевого положения (с некоторой статической ошибкой) темп изменения величин  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  становится соизмеримым с шумами, вносимыми системой получения абсолютных координат. Это приводит к появлению выбросов в управляющих воздействиях  $F_a$ ,  $F_b$  и, как следствие, отклонению объекта от целевого положения. На рис. 3, *a* показаны величины  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  и  $U_1$ ,  $U_2$  во временной области в системе управления роботом e-ruck 2187 [9] при перемещении вдоль траектории

$$\left\{ \begin{array}{ll} y_0(t) = v_0 t, \dot{y}_0(t) = v_0, x_0(t) = 0, \dot{x}_0(t) = 0 & \text{при } 0 \leq t < t_1, \\ y_0(t) = v_0 t_1, \dot{y}_0(t) = 0, x_0(t) = v_0 t, \dot{x}_0(t) = v_0 & \text{при } t_1 \leq t < 1,5t_1, \\ y_0(t) = v_0(t_1 - t), \dot{y}_0(t) = -v_0, x_0(t) = 0,5v_0 t_1, \dot{x}_0(t) = 0 & \text{при } 1,5t_1 \leq t < 2,5t_1, \\ y_0(t) = 0, \dot{y}_0(t) = 0, x_0(t) = v_0(0,5t_1 - t), \dot{x}_0(t) = -v_0 & \text{при } 2,5t_1 \leq t < 3t_1 \end{array} \right. \quad (5)$$

с параметрами  $y_0(0) = 0,1$  м,  $x_0(0) = 0,1$  м,  $v_0 = 0,01$  м/с,  $t_1 = 30$  с. Выбросы в управляющих воздействиях  $U_1$ ,  $U_2$  достигают 50-процентного значения от максимально допустимого.

В данном случае для сглаживания управляющих воздействий  $U_1$ ,  $U_2$  целесообразно ввести параметрическую подстройку алгоритма управления (3), (4), где изменяемыми па-

раметрами являются коэффициенты усиления  $c_1, c_2$ . Для этого запишем (3), (4) в виде

$$F_a = \begin{cases} c_1^0 f_1(d) + c_1 f_2(d)u & \text{при } v > 0 \text{ или } u \geq 0, \\ 0 & \text{при } v = 0 \text{ и } u < 0, \\ 0 & \text{при } v > v_{\max} \text{ и } u > 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$F_b = \begin{cases} -c_2 f_3(d)S_3 & \text{при } -w_{\max} \leq w \leq w_{\max}, \\ 0 & \text{при } w > w_{\max} \text{ и } S_3 < 0, \\ 0 & \text{при } w < -w_{\max} \text{ и } S_3 > 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ ;  $c_1^0 > 0$  — постоянный коэффициент, определяемый скоростью  $v_0$  перемещения целевой точки. Функции  $f_1, f_2, f_3$  принимают значения в диапазоне  $[0 \dots 1]$  и удовлетворяют условиям

$$\begin{cases} f_1 = 0, f_2 = 1, f_3 = 1 & \text{при } d > \epsilon_2, \\ f_1 = 0,9, f_2 = 0,1, f_3 = 0,1 & \text{при } \epsilon_1 < d \leq \epsilon_2, \\ f_1 = 0, f_2 = 0, f_3 = 0 & \text{при } d \leq \epsilon_1, \end{cases} \quad (8)$$

где  $0 < \epsilon_1 < \epsilon_2$  — окрестности целевого положения  $d_0$ ,  $\epsilon_1 < d_0 < \epsilon_2$ . Введение функций  $f_1, f_2, f_3$  обеспечивает подстройку алгоритма управления (3), (4), т. е. уменьшение чувствительности соответствующих каналов управления при приближении объекта к малой окрестности целевого положения. Для обеспечения плавности изменения величин  $f_1, f_2, f_3$  при переходах между условиями (8) могут быть определены дополнительные окрестности целевого положения  $d_0$ . Величины  $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi, U_1, U_2$  во временной области при использовании алгоритма (6), (7) приведены на рис. 3, *b*. Наблюдается значительное уменьшение выбросов в управляющих воздействиях  $U_1, U_2$ .

**3. Управление с запаздыванием.** Как и в большинстве реальных систем автоматического регулирования, в системе управления роботом неизбежно присутствуют запаздывания, обусловленные конечной скоростью работы радиоканала связи с роботом, обработки видеоизображения с КМОП-камеры и др. В случае управления группой роботов пренебрежение этими запаздываниями может привести к существенным ошибкам управления.

Уравнения (1) представим в более компактном виде:

$$\dot{q}(t) = f(q(t), u(t - T)), \quad (9)$$

где  $q = (x, y, \phi)$  — вектор состояния системы;  $f(q, u)$  — вектор-функция, определяемая моделью объекта (1);  $u = (U_1, U_2)$  — вектор управляющих воздействий, подаваемых на робот.

На рис. 4, *a* изображена структурная схема системы управления, а на рис. 4, *b* — блок-схема с использованием дискретных передаточных функций соответствующих элементов.

Общее время запаздывания в системе связано с периодом квантования  $\Delta t$  соотношением

$$T = (n_1 + n_2)\Delta t = N\Delta t \quad (10)$$

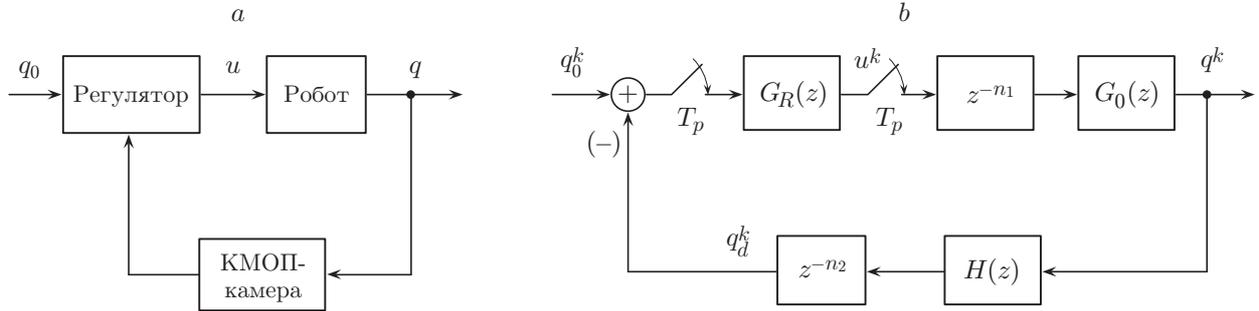


Рис. 4

и складывается из величин  $n_1, n_2$  относительного запаздывания в канале управления и измерения выходной координаты системы соответственно.

3.1. *Аналитический экстраполятор.* Так как ни одна вспомогательная величина, не содержащая запаздывания, не доступна для измерений, воспользуемся для компенсации запаздывания математической моделью объекта управления. Один из способов заключается в пропуске выходного сигнала системы через модель объекта или получении оценок координат  $x, y, \phi$  для текущего момента времени  $t$  [10]. Оценки определяются соотношением

$$\hat{q}^k = q_d^k + \sum_{i=k}^{k+N} f(q_m^i, u^{i-N})\Delta t, \tag{11}$$

где  $\hat{q}^k$  — оценка вектора состояния с учётом запаздывания  $T$ ;  $q_d^k$  — значение вектора состояния в текущий момент времени  $t = k\Delta t$ , полученное от системы определения координат;  $q_m^i$  — состояние модели (9);  $q_m^k = q_d^k$ . Отметим, что в данном случае необходимо наличие информации о последних  $N$  отсчётах управляющего воздействия  $u$ . Структурная схема системы с коррекцией запаздывания приведена на рис. 5.

Результаты численного моделирования системы управления (6), (7) движением робота вдоль траектории (5) с введённым запаздыванием  $T = 1,5$  с приведены на рис. 6, *a*: траектории перемещения робота (штрихпунктирная кривая) и цели (пунктирная кривая). Изменение величин  $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi$  и  $U_1, U_2$  во временной области изображено на рис. 6, *b*. Отчётливо видны колебания курса объекта при движении относительно заданной траектории, а также колебания величин  $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi$  и  $U_1, U_2$ , при этом амплитуда колебаний определяется величиной запаздывания. (Обозначения кривых далее по тексту, как на рис. 6.)

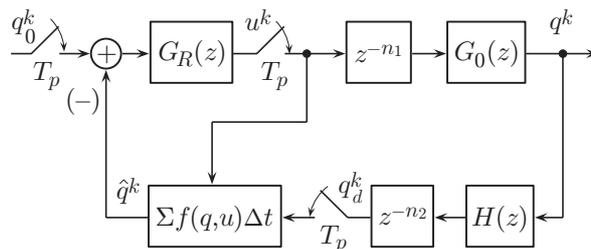


Рис. 5

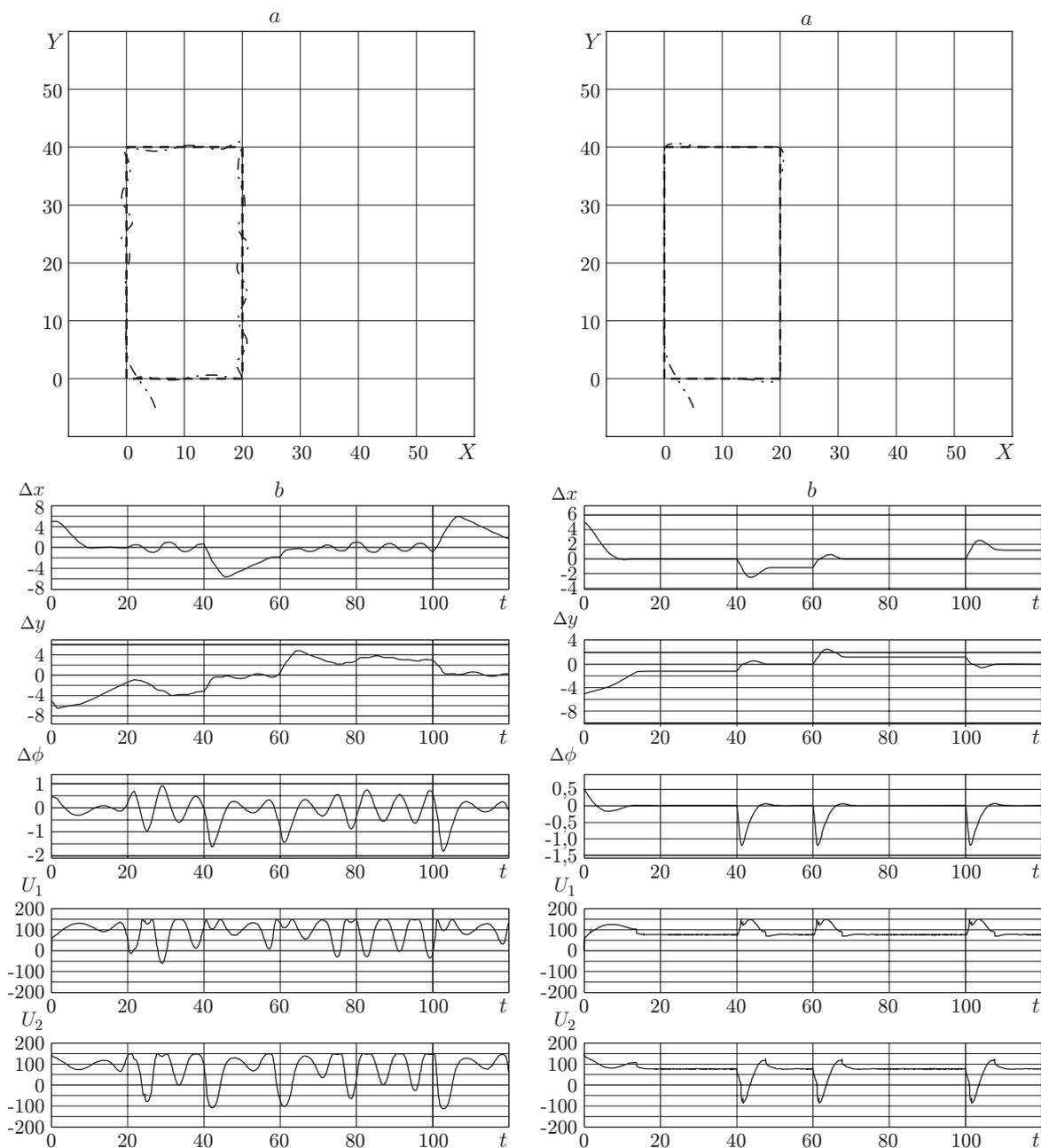


Рис. 6

Рис. 7

На рис. 7 представлены результаты численного моделирования системы управления (6), (7) с коррекцией запаздывания с помощью соотношения (11): траектории перемещения робота и цели (а); изменение величин  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  и  $U_1$ ,  $U_2$  во временной области (b).

Для экспериментальной проверки в систему управления роботом введена искусственная задержка  $T = 1,35$  с координаты, получаемой от видекамеры. Результаты приведены на рис. 8, где изображены траектории перемещения робота и цели (а), а также изменение величин  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  и  $U_1$ ,  $U_2$  во временной области (b). При этом задержка, обусловленная текущей конфигурацией аппаратно-программного обеспечения, не превышала 0,2 с и не оказывала заметного влияния на качество управления.

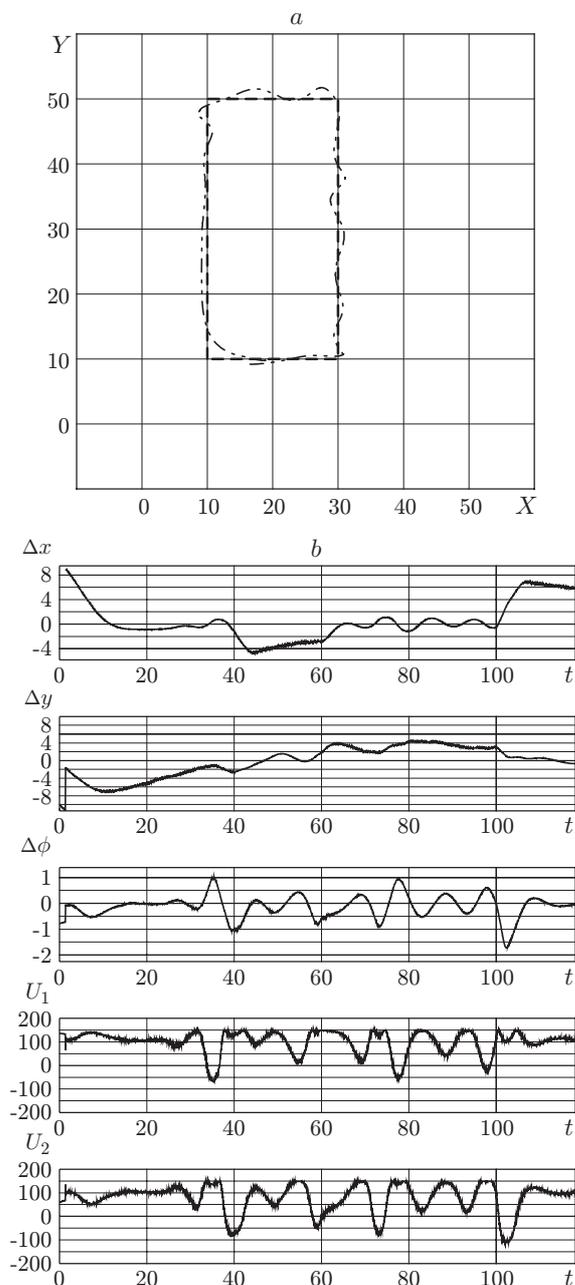


Рис. 8

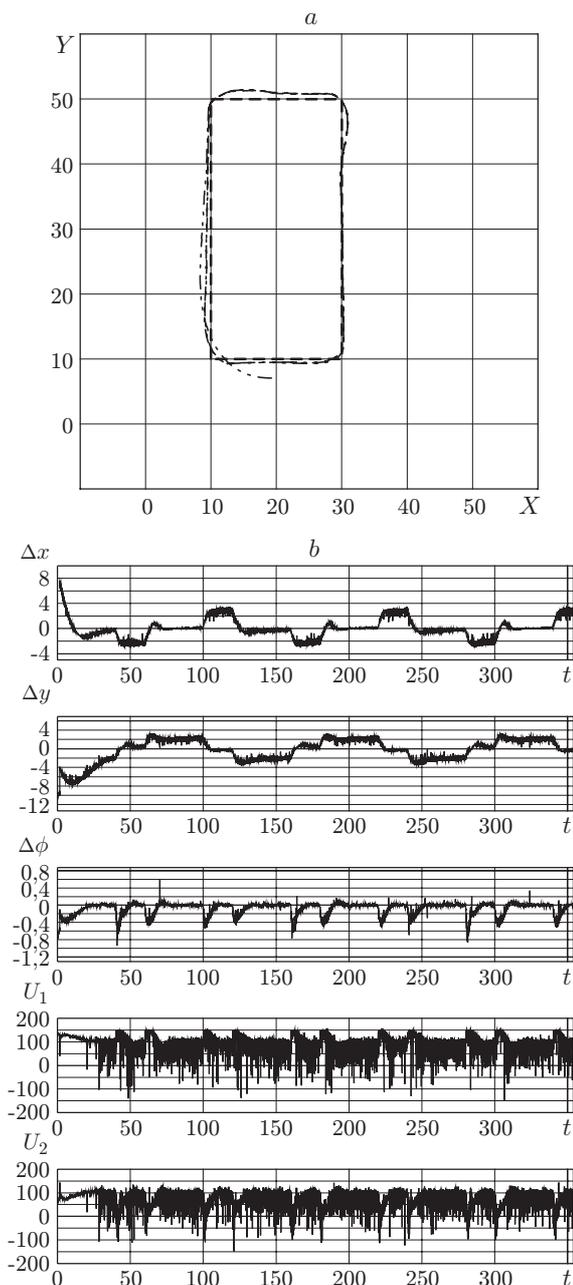


Рис. 9

Для коррекции запаздывания с помощью выражения (11) необходимо вычислять интеграл на каждом шаге квантования. Кроме того, оказывается существенным влияние на вводимую коррекцию таких эффектов, как проскальзывание колёс, неровности поверхности при использовании управляющих воздействий, подаваемых на робот. Пренебрежение этими эффектами в модели (9) приводит к накоплению ошибки при интегрировании и, как следствие, появлению выбросов в величинах  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  и управляющих воздействиях  $U_1$ ,  $U_2$  (рис. 9: траектории перемещения робота и цели (a); изменение величин  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  и  $U_1, U_2$  во временной области (b)).

3.2. *Регулятор Смита.* От данных недостатков частично свободна схема регулирования, предложенная Смитом [11] и основанная на введении в модель объекта управления

эквивалентного запаздывания (рис. 10, а). На каждом шаге квантования производится вычисление аддитивной поправки к координатам  $x, y, \phi$ , но в отличие от выражения (11) за один такт (операция интегрирования). Данная поправка равна рассогласованию между выходом модели без запаздывания и выходом с учётом запаздывания при использовании в модели управляющего воздействия, подаваемого на робот:

$$\begin{cases} q_m^k = q_m^{k-1} + f(q_m^{k-1}, u^k)\Delta t, \\ \hat{q}^k = q_d^k + q_m^k - q_m^{k-N}. \end{cases} \quad (12)$$

Такой алгоритм обеспечивает меньшую зависимость коррекции от эффектов, обусловленных проскальзыванием колёс, неровностями поверхности на текущем шаге квантования, однако приводит к появлению накапливающейся ошибки. Это связано с тем, что при расчёте поправки не учитывается выходной сигнал системы получения абсолютных координат робота. Результаты численного моделирования коррекции запаздывания в модели (9) с помощью регулятора Смита не отличаются от результатов для аналитического экстраполятора (см. рис. 7). Интерес представляют экспериментальные результаты движения робота вдоль траектории (5), где коррекция запаздывания  $T = 1,35$  с осуществляется с помощью регулятора Смита. На рис. 10, б показаны траектории перемещения робота и цели, робот совершает три прохода всего маршрута без остановки. Отметим, что отсутствуют выбросы в величинах  $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi$  и управляющих воздействиях  $U_1, U_2$  (рис. 10, в), но наблюдается возрастающее отклонение робота от заданной траектории движения.

3.3. *Коррекция оценки аналитического экстраполятора с помощью фильтра Калмана.* Для подавления отклонений величин  $\Delta x, \Delta y, \Delta \phi$  и выбросов в управляющих воздействиях  $U_1, U_2$  при использовании описанной выше схемы регулирования (11) воспользуемся рекурсивным фильтром Калмана [12]. Исходную модель объекта управления (9) представим в виде

$$\begin{cases} q^{k+1} = f(q^k, u^k) + w^k, \\ \hat{q}^k = q^k + v^k, \end{cases} \quad (13)$$

где  $w^k$  — нормальный случайный процесс с нулевым средним и ковариационной матрицей  $Q^k$ , описывающий погрешности моделирования;  $v^k$  — белый гауссов шум измерений с нулевым средним и ковариационной матрицей  $R^k$ , описывающий шум датчиков;  $\hat{q}^k$  — выход датчиков измерения состояния  $q^k$  объекта.

Модель (13) является нелинейной, поэтому применим расширенный фильтр Калмана (РФК), в котором модель линеаризуется в некоторой окрестности рабочей точки  $(\hat{q}_{ekf}^k, u^k)$  с помощью разложения в ряд Тейлора [5]:

$$q^{k+1} \approx f(\hat{q}_{ekf}^k, u^k) + F^k[q^k - \hat{q}_{ekf}^k] + w(k), \quad (14)$$

где

$$F^k = \left. \frac{\partial f(q^k, u^k)}{\partial q^k} \right|_{q^k = \hat{q}_{ekf}^k}. \quad (15)$$

Соответствующие выражения экстраполяции и коррекции РФК имеют вид

$$\hat{q}_{ekf}^{k+1} = f(\hat{q}_{ekf}^k, u^k), \quad (16)$$

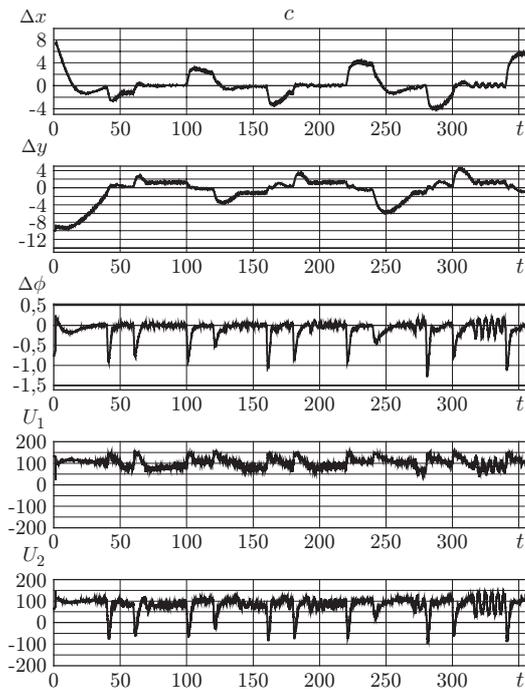
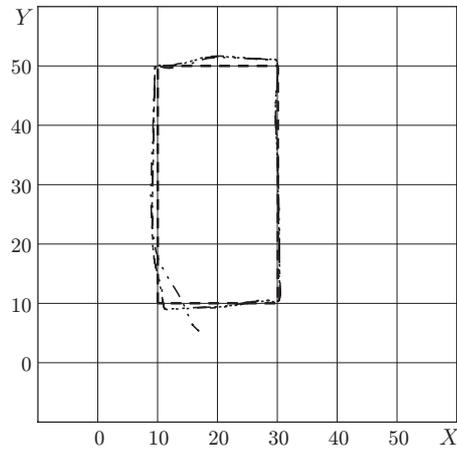
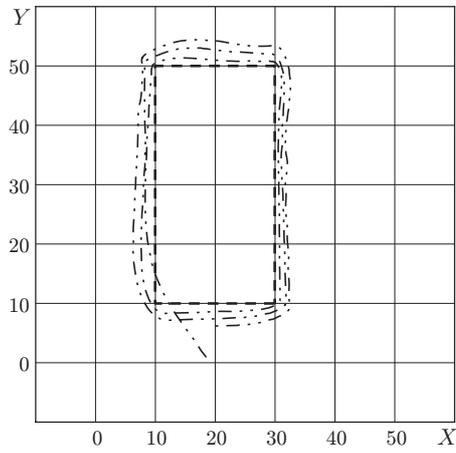
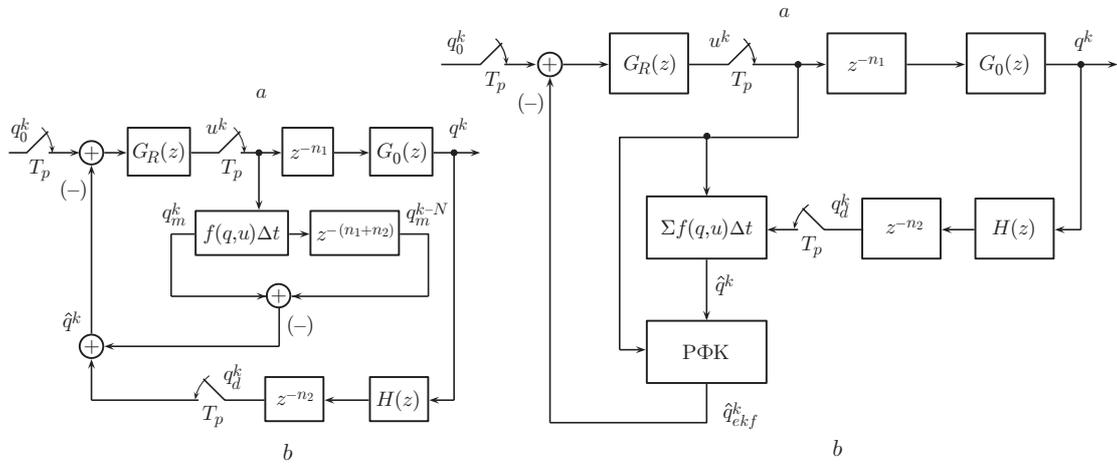


Рис. 10

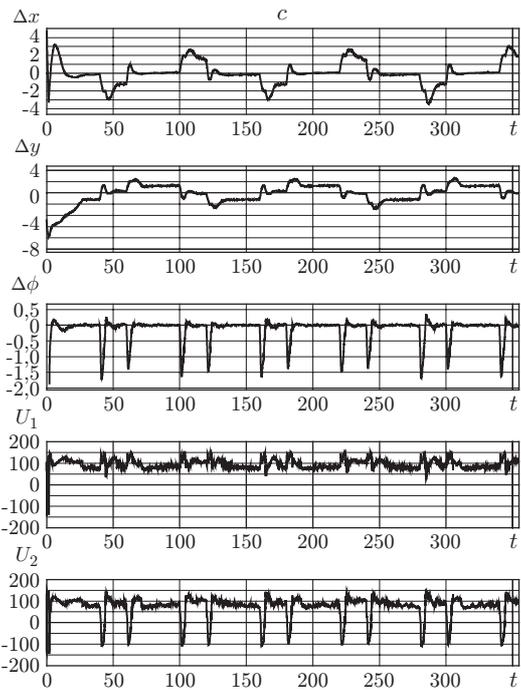


Рис. 11

$$P^{k+1} = F^k P^k (F^k)^T + Q^k, \quad (17)$$

$$K^k = P^k / (P^k + R^k), \quad (18)$$

$$\hat{q}_{ekf}^{k+1} = \hat{q}_{ekf}^k + K^k [\hat{q}^k - \hat{q}_{ekf}^k]. \quad (19)$$

На рис. 11, *a* показана блок-схема системы управления, где выход блока оценки состояния (11) объекта поступает на вход РФК, использующего тот же сигнал управления от регулятора. На рис. 11, *b*, *c* приведены результаты эксперимента (траектории перемещения робота и цели (*b*); изменение величин  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  и  $U_1$ ,  $U_2$  во временной области (*c*)). Отсутствуют отклонения величин  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  и выбросы в управляющих воздействиях  $U_1$ ,  $U_2$ , а также отклонение робота от заданной траектории движения.

**Заключение.** В данной работе рассмотрены два традиционных метода компенсации транспортного запаздывания: аналитический экстраполятор и регулятор Смита — применительно к системе управления траекторным движением мобильного робота. Экспериментальные результаты показывают неудовлетворительное качество регулирования при использовании данных методов, что объясняется наличием таких эффектов, как проскальзывание колёс и неровности поверхности при перемещении робота, влияющих на вводимую коррекцию. Предложен способ компенсации запаздывания, основанный на применении аналитического экстраполятора и расширенного фильтра Калмана. Сравнительный анализ результатов экспериментов с использованием аналитического экстраполятора, регулятора Смита и рассматриваемого подхода показывает, что представленная схема компенсации запаздывания позволяет существенно уменьшить зависимость управляющих воздействий, вырабатываемых системой управления роботом, от внешних возмущений, связанных с механическими эффектами и шумами измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yang Y., Minai A. A., Polycarpou M. M.** Decentralized cooperative search by networked UAVs in an uncertain environment // Proc. of the American Control Conf. Boston, USA, 2004. Vol. 6. P. 5558–5563.
2. **Kube C. R., Zhang H.** The use of perceptual cues in multi-robot box-pushing // Proc. of the IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation. Minneapolis, USA, 1996. Vol. 3. P. 2085–2090.
3. **Brady K.** Time-delayed control of telerobotic manipulators: Ph. D. Dissertation. University of Washington. Seattle, USA, 1997.
4. **Alt G. H., Lages W. F.** Networked robot control with delay compensation // Fifth Real-Time Linux Workshop. Valencia, 2003.
5. **Oliveira V. M., Lages W. F.** Mobile robot control over the internet with delay compensation // 11th IFAC Symp. on Information Control Problems in Manufacturing. Salvador, Bahia, 2004.
6. **Emura S., Tachi S.** Compensation of time lag between actual and virtual spaces by multi-sensor integration // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI'94). Las Vegas, USA, 1994. P. 463–469.
7. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Нестеров А. А.** Децентрализованное управление подвижными объектами в составе маневрирующей группы // Автометрия. 2007. **43**, № 3. С. 31–39.

- 
8. **Mondada F., Bonani M., Raemy X. et al.** The e-puck, a robot designed for education in engineering // Proc. of the 9th Conf. on Autonomous Robot Systems and Competitions. 2009. Vol. 1(1). P. 59–65.
  9. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Мальцев А. С. и др.** Управление траекторным движением группы мобильных роботов: моделирование и эксперимент // Матер. X Междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2010)». Новосибирск, 2010. С. 101–106.
  10. **Moore C. F., Smith C. L., Murill P. W.** Improved algorithm for direct digital control // Instrum. Control Syst. 1970. **43**, N 1. P. 70–74.
  11. **Smith J. M.** A controller to overcome deadtime // ISA Journ. 1959. **6**, N 2. P. 28–33.
  12. **Kalman R. E.** A new approach to linear filtering and prediction problems // Journ. Basic Eng. 1960. **82**, N 1. P. 35–45.

*Поступила в редакцию 15 февраля 2011 г.*

---