

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, М.А. Соболев, М.Н. Филиппов  
Институт автоматизи́ки и электротехники СО РАН, г. Новосибирск  
kotov@idisys.iae.nsk.su, alexandr@idisys.iae.nsk.su

Ключевые слова: система навигации, инерциальная система, акселерометр, фильтр Калмана

## Аннотация

Предложенная ранее система навигации для автономного мобильного робота дополнена использованием данных от инерциальных датчиков. Алгоритм оценивания координат автономного мобильного робота основан на совместном использовании локальной системы навигации и системы технического зрения. В работе приведены результаты экспериментов с мобильным роботом *e-risk*, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

## Введение

В последние десятилетия проявляется значительный интерес в области управления автономными мобильными роботами, область применения которых может включать в себя исследование, разведку или выполнение другой задачи в труднодоступной или неизвестной среде. На сегодняшний день задача локализации или определения пространственного положения является одной из основных решаемых задач в навигационной системе автономного мобильного робота. Методы решения задачи локализации включают в себя использование различной доступной информации: от системы одометрии робота [6] и гиро/инерциальных датчиков [9], дальнометрической информации от ультразвуковых и лазерных датчиков [7, 8], оценку абсолютных координат по активным маякам или специальным меткам [4] и дальнейшее комплексирование данных с помощью фильтра Калмана.

В работе [3] предложен алгоритм оценивания координат робота по моноизображениям отдельных меток, получаемым последовательно во время движения с помощью видеокамеры, жестко закрепленной на роботе. В данной работе предложенная система навигации дополнена использованием информации от инерциальных датчиков, позволяющей осуществлять коррекцию смещения робота, вызванного проскальзыванием колес и неровностями поверхности. Приведены результаты экспериментов с мобильным роботом *e-risk*, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

## 1. Описание объекта управления

В качестве объекта управления используется мобильный робот *e-risk*, разработанный в университете EPFL, Швейцария и предназначенный для исследовательских и образовательных целей [10]. Этот двухколесный робот представляет собой платформу с независимыми приводами колес, где каждый привод является парой «шаговый двигатель — редуктор». Робот оснащен 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 колес, светодиоды и динамический громкоговоритель для светозвуковой коммуникации и индикации состояния, рис. 1а. Коммуникация робота с внешним компьютером может осуществляться посредством беспроводной связи (Bluetooth) или через проводное соединение (RS232).

Уравнения кинематического и упрощенного динамического описания робота имеют следующий вид [1]:

$$(1) \begin{cases} \dot{x} = v \cdot \sin \varphi; \\ \dot{y} = v \cdot \cos \varphi; \\ \dot{\varphi} = \omega; \\ v = \frac{1}{2a_0}(U_1 + U_2); \\ \omega = \frac{1}{2a_0l}(U_1 - U_2), \end{cases}$$

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

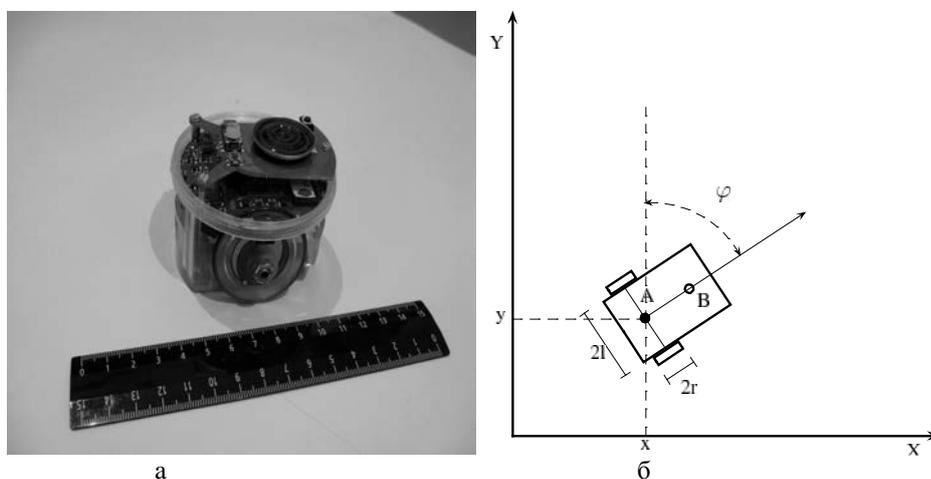


Рис. 1. Мобильный робот e-risk

Значительный объём информации от датчиков при данной конфигурации программно-аппаратного обеспечения, в частности системы связи, приводит к заметной временной задержке в передаче данных от робота к компьютеру. Это приводит к снижению точности аппроксимации траектории движения робота с привлечением информации о величине угла поворота шагового двигателя каждого колеса [3]. Для получения требуемой точности аппроксимации целесообразно использовать модель (1), рассогласование которой с одометрией робота не превышает погрешности в определении координат объекта, получаемых с помощью видеокамеры [1].

## 2. Система технического зрения

### 2.1 Описание системы

В качестве системы технического зрения используется жестко закрепленная в передней части мобильной платформы видеокамера [10], позволяющая обнаруживать специальные навигационные метки на местности, относительно которых определяются абсолютные координаты робота, и корректируется его траектория движения. Для определения абсолютных координат меток используется та же видеосистема, что и для получения абсолютных координат робота [3].

Обработка изображения с видеокамеры робота включает в себя монохромизацию, пороговую обработку и определение положения робота относительно навигационной метки, заданного углом направления  $\alpha$  на метку относительно курсового угла  $\varphi$  и расстоянием  $d$  до метки. На рис. 2а показано положение робота относительно метки.

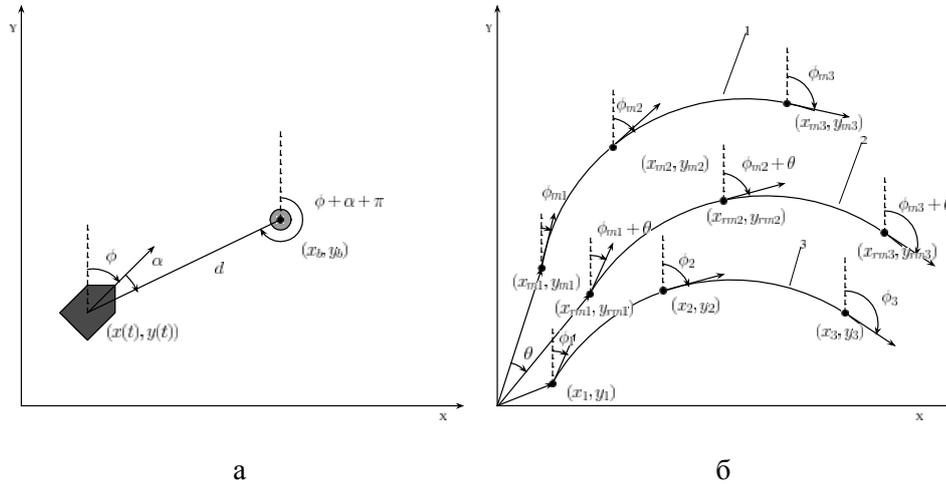


Рис. 2. а) Положение робота относительно навигационной метки; б) Траектории движения робота: 1 – траектория модели (1), 2 – траектория модели (1) после поворота на угол  $\theta$ , 3 – траектория по данным измерений от меток (2).

При известных абсолютных координатах  $(x_b, y_b)$  обнаруженной метки и измеренных параметрах  $\alpha, d$  мы можем вычислить абсолютные координаты  $(x, y)$  положения робота при известном курсовом угле  $\phi$ :

$$(2) \begin{cases} x = x_b + d_b \cdot \sin(\phi + \alpha_b + \pi); \\ y = y_b + d_b \cdot \cos(\phi + \alpha_b + \pi). \end{cases}$$

## 2.2. Алгоритм оценки абсолютных координат робота по меткам

Будем полагать, что за некоторое время движения по предписанной траектории робот получает  $N$  измерений (изображений с видеокамеры) от  $L$  меток ( $N \geq L$ ), и траектория движения робота на интервале времени набора измерений является достаточно гладкой для обеспечения малого влияния эффектов, связанных с проскальзыванием колес. Тогда можно считать, что траектория модели (1) имеет некоторое смещение  $\Delta x, \Delta y$  и поворот на угол  $\theta$  относительно истинной (измеренной) траектории движения, рис. 2б.

После поворота на угол  $\theta$  относительно начала координат и смещения на  $\Delta x, \Delta y$  траектория модели (1) и траектория (2), полученная по данным измерений от меток, должны совпадать с некоторой погрешностью, определяемой эффектами проскальзывания колес и шумами измерений:

$$(3) \begin{cases} \Delta x + x_{mi} \cos \theta + y_{mi} \sin \theta \approx x_{bl} + d_{bli} \sin(\varphi_{mi} + \theta + \alpha_{bli} + \pi) \\ \Delta y - x_{mi} \sin \theta + y_{mi} \cos \theta \approx y_{bl} + d_{bli} \cos(\varphi_{mi} + \theta + \alpha_{bli} + \pi) \end{cases}, \quad i = 1, \dots, N, \quad l = 1, \dots, L.$$

Здесь  $(x_{mi}, y_{mi}, \varphi_{mi})$  – координаты модели (1), соответствующие моменту времени  $i$ -го измерения параметров  $\alpha_{bli}, d_{bli}$  для метки с индексом  $l$ . Угол поворота  $\theta$  входит в правую часть (3), так как  $\varphi_i = \varphi_{mi} + \theta$  в (2). Соотношения (3) образуют систему нелинейных уравнений, позволяющих вычислить координаты  $x, y, \varphi$  истинного положения робота, для решения которой можно выполнить линеаризацию либо минимизировать следующее выражение:

$$(4) f = \sum_{i=1}^N w_i [Y_{Li} - Y_{Ri}]^2,$$

где  $Y_{Li}, Y_{Ri}$  – векторы, соответствующие левой и правой части уравнения (3);  $w_i$  – весовой коэффициент, приписываемый измерению  $i$ . После нахождения величин  $\Delta x, \Delta y, \theta$  вычислим абсолютные координаты робота, соответствующие моменту времени последнего измерения:

$$(5) \begin{cases} x = \Delta x + x_{mN} \cos \theta + y_{mN} \sin \theta; \\ y = \Delta y - x_{mN} \sin \theta + y_{mN} \cos \theta; \\ \varphi = \varphi_{mN} + \theta. \end{cases}$$

## 3. Инерциальная система

### 3.1. Описание и характеристики чувствительного элемента

Инерциальным датчиком робота является микромеханический 3D акселерометр MMA7260Q с чувствительностью около 800 мВ/г в рабочем диапазоне  $\pm 1.5g$ , шумом 4.7 мВ и полосой пропускания 6кГц по осям ХУ. Ось У акселерометра совмещена с продольной осью робота, рис. 3а. На рис. 3б представлены временные зависимости величин ускорений по соответствующим осям датчика во время прямолинейного движения робота с последовательным ускорением. Команды на установление значений линейной скорости робота 1.30 см/с, 3.91 см/с, 9.13 см/с подавались в моменты времени 0.0 с, 0.1 с, 0.2 с, соответственно. Из графиков отчетливо заметно влияние работы шаговых двигателей, т. е. разгона и торможения на каждом шаге привода, на величину ускорения в виде периодических колебаний. На движение робота данный эффект не оказывает влияния, поскольку для данных частот (скоростей вращения приводов) робот выступает низкочастотным фильтром, однако выступает дополнительным источником погрешности в оценке положения робота. Исходя из этого, выходные сигналы акселерометра целесообразно пропустить через фильтр нижних частот, рис. 3б.

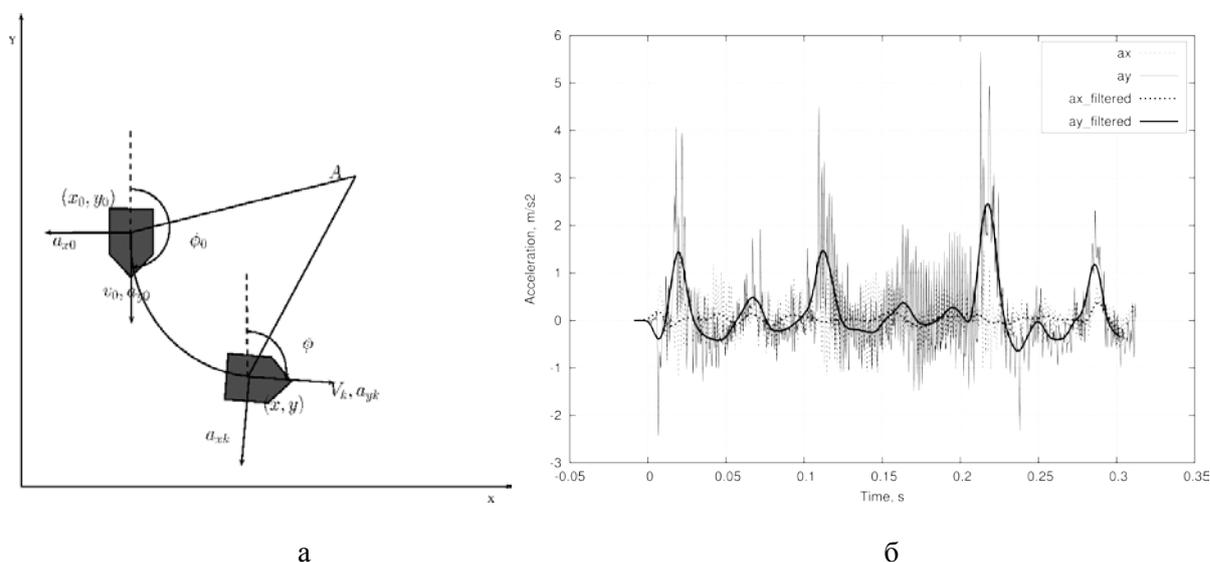


Рис. 3. Движение робота при продольном проскальзывании (а); измеренные и отфильтрованные выходные сигналы акселерометра (б).

### 3.2 Коррекция движения робота

Наличие на мобильной платформе *e-risk* инерциального датчика позволяет оценить только продольное проскальзывание. Проскальзывание приводит к вращению мобильного робота относительно некоторой неподвижной точки, рис. 3а. Коррекция смещения робота во время проскальзывания колес выполняется при превышении некоторой пороговой величины ускорения на выходе датчика. Начиная с этого момента времени, записанные и отфильтрованные  $K$  отсчетов величин ускорений используются для вычисления угла поворота робота:

$$(6) \varphi_n = \varphi_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_{xi}}{V_i} \delta t,$$

где

$$(7) V_i = v_0 + \sum_{k=1}^i a_{yk} \delta t,$$

$v_0$ ,  $\varphi_0$  – линейная скорость и курс робота до начала коррекции, соответственно;  $a_{xi}$ ,  $a_{yk}$  – нормальная и тангенциальная составляющие ускорения движения робота, соответственно;  $\delta t$  – шаг квантования по времени оцифрованных сигналов датчика;  $n=1, \dots, K$ .

Координаты  $x$ ,  $y$  положения робота вычисляются путем подстановки значений курсового угла  $\varphi_n$  и скорости  $V_i$  в кинематические соотношения модели (1).

#### 4. Комплексование данных с использованием фильтра Калмана

Для комплексования данных программной модели (1) и оценки (5), (6) положения робота воспользуемся рекурсивным фильтром Калмана. Исходную модель объекта управления (1) представим в виде:

$$(8) \begin{cases} q^{k+1} = f(q^k, u^k) + \omega^k, \\ \hat{q}^k = q^k + v^k, \end{cases}$$

где  $q^k = [x^k, y^k, \phi^k]^T$ ,  $u^k = [U_1^k, U_2^k]^T$  — векторы положения робота и управляющих воздействий в момент времени  $k\Delta t$ ,  $\Delta t$  — шаг квантования по времени модели (1);  $\omega^k$  — нормальный случайный процесс, описывающий погрешности моделирования, с нулевым средним и ковариационной матрицей  $Q^k$ ;  $v^k$  — белый гауссовский шум измерений с нулевым средним и ковариационной матрицей  $R^k$ ;  $\hat{q}^k$  — выход датчиков измерения состояния  $q^k$  объекта, т. е. оценка (5), (6).

Модель (8) является нелинейной, поэтому применим расширенный фильтр Калмана (РФК), где модель линеаризуется в некоторой окрестности рабочей точки  $(\hat{q}_{ekf}^k, u^k)$  с помощью разложения в ряд Тейлора:

$$(9) q^{k+1} \approx f(\hat{q}_{ekf}^k, u^k) + F^k [q^k - \hat{q}_{ekf}^k] + \omega^k,$$

где

$$(10) F^k = \left. \frac{\partial f(q^k, u^k)}{\partial q^k} \right|_{q^k = \hat{q}_{ekf}^k}.$$

Выражения экстраполяции и коррекции РФК имеют вид:

$$(11) \hat{q}_{ekf}^{k+1} = f(\hat{q}_{ekf}^k, u^k),$$

$$(12) P^{k+1} = F^k P^k (\hat{F})^T + Q^k,$$

$$(13) K^k = \frac{P^k}{P^k + R^k},$$

$$(14) \hat{q}_{ekf}^{k+1} = \hat{q}_{ekf}^k + K^k [\hat{q}^k - \hat{q}_{ekf}^k],$$

$$(15) P^{k+1} = (I - K^k) P^{k+1}.$$

#### 5. Результаты экспериментов

##### 5.1 Коррекция движения робота с помощью локальной системы навигации

На рис. 4а показано перемещение робота по прямоугольной траектории, вида:

$$(16) \begin{cases} \dot{x}(t) = 0, \dot{y}(t) = v_0 & \text{при } 0 \leq t < t_y; \\ \dot{x}(t) = v_0, \dot{y}(t) = 0 & \text{при } t_y \leq t < t_y + t_x; \\ \dot{x}(t) = 0, \dot{y}(t) = -v_0 & \text{при } t_y + t_x \leq t < 2t_y + t_x; \\ \dot{x}(t) = -v_0, \dot{y}(t) = 0 & \text{при } 2t_y + t_x \leq t < 2(t_y + t_x), \end{cases}$$

где  $v_0 = 10$  см/с,  $t_x = 5$  с,  $t_y = 10$  с.

Проскальзывание колес имитируется остановкой или изменением скорости одного из колес на время  $\Delta t$ . Общее число проскальзываний равно пяти. Проскальзывание осуществлялось в середине большей стороны прямоугольной траектории движения робота. На рис. 4б приведена временная зависимость курсового угла робота и скорректированное значение курсового угла модели (1). Отчетливо видно уменьшение рассогласования скорректированной траектории движения модели (1) с данными от системы получения абсолютных координат робота в моменты времени 40 с, 63 с, 90 с, 118 с, 138 с. На рис. 5 приведена величина ошибки навигации, которая определяется как геометрическое расстояние между точками траектории робота по данным видеосистемы и траектории по оценке координат РФК.

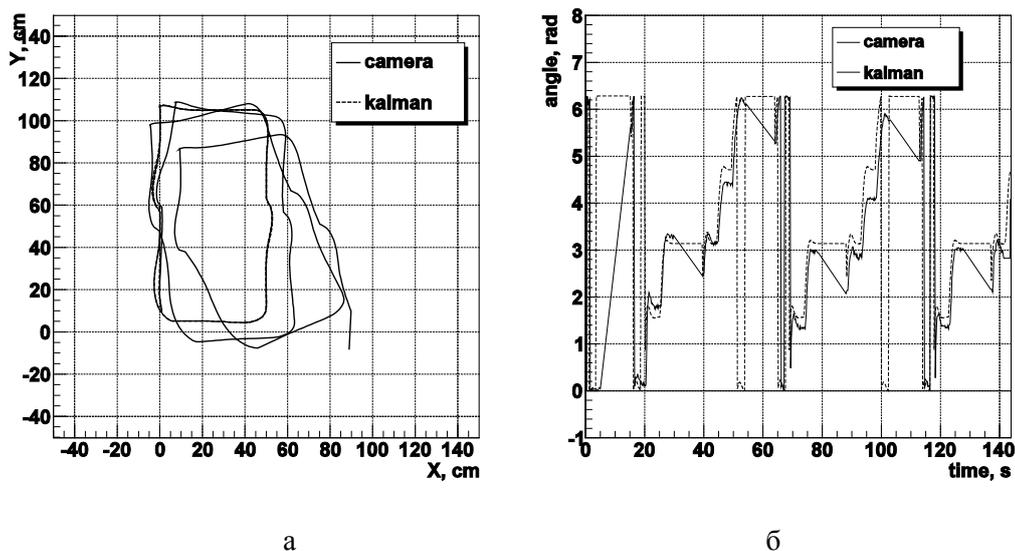


Рис. 4. Перемещение робота по прямоугольной траектории и траектория движения модели (а), курсовой угол модели по данным с видекамеры и скорректированное значение угла (б) (б).

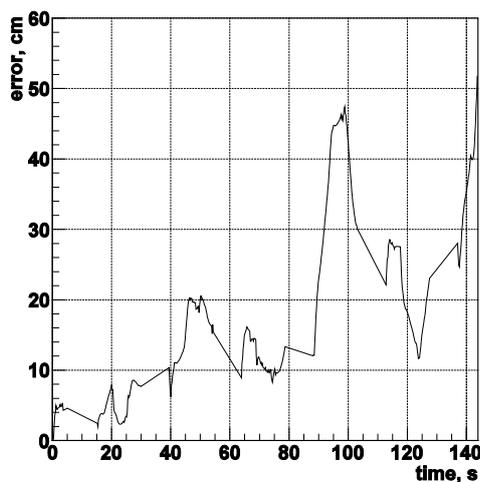


Рис. 5. Ошибка оценивания траектории.

### 5.2 Коррекция движения робота с помощью системы технического зрения

Для проверки эффективности предложенного метода проведён ряд экспериментов по управлению роботом при движении по траектории, заданной уравнением:

$$(17) \begin{cases} x_0(t) = 17 + 12 \sin\left(\frac{\pi}{60}t\right), & y_0(t) = 5 + 12 \cos\left(\frac{\pi}{60}t\right), & \varphi_0(t) = \frac{\pi}{60}t + \frac{\pi}{2}, & \text{при } t < 60; \\ x_0(t) = 29 - 0.7t, & y_0(t) = 5, & \varphi_0(t) = \frac{3\pi}{2}, & \text{при } 60 \leq t \leq 94.3, \end{cases}$$

где  $x_0, y_0, \varphi_0$  — координаты целевой точки. При движении робота по заданной траектории без коррекции его координат, только с использованием одометрии, возрастает отклонение робота от траектории движения, рис. 6а, 7а. Это объясняется наличием внешних возмущений при движении робота — проскальзывания колёс, неровностей поверхности и пр. Результаты экспери-

мента с введенной коррекцией координат робота по формулам (5), (7), (14) показаны на рис. 6б, 7б. Коррекция положения робота во время движения по заданной траектории осуществлялась по двум навигационным меткам с координатами  $x_{b1} = 19.78$  см,  $y_{b1} = 27.54$  см и  $x_{b2} = 32.45$  см,  $y_{b2} = 18.49$  см. Для случая движения робота без коррекции, навигационная ошибка определяется как геометрическое расстояние между точками траектории робота по данным внешней видеосистемы и траектории модели (1), полученными в один и тот же момент времени, рис. 7а. В случае движения робота с коррекцией, вычисляется ошибка между траекторией робота по данным видеосистемы и траекторией по оценке координат РФК, рис. 7б. На графиках показано согласование оценки координат РФК и координат по данным видеосистемы в точках коррекции, а также отсутствие нарастания ошибки навигации.

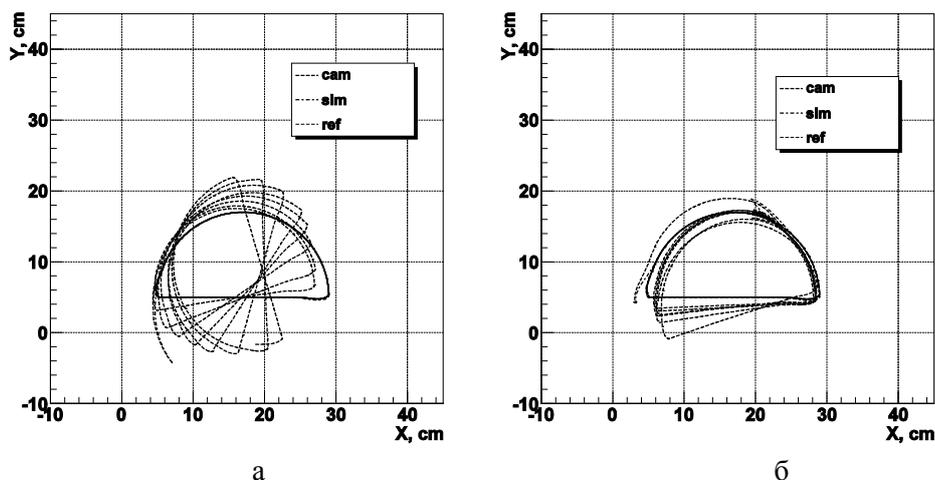


Рис. 6. Перемещение робота по траектории, вида (16): а - без коррекции, б - с коррекцией

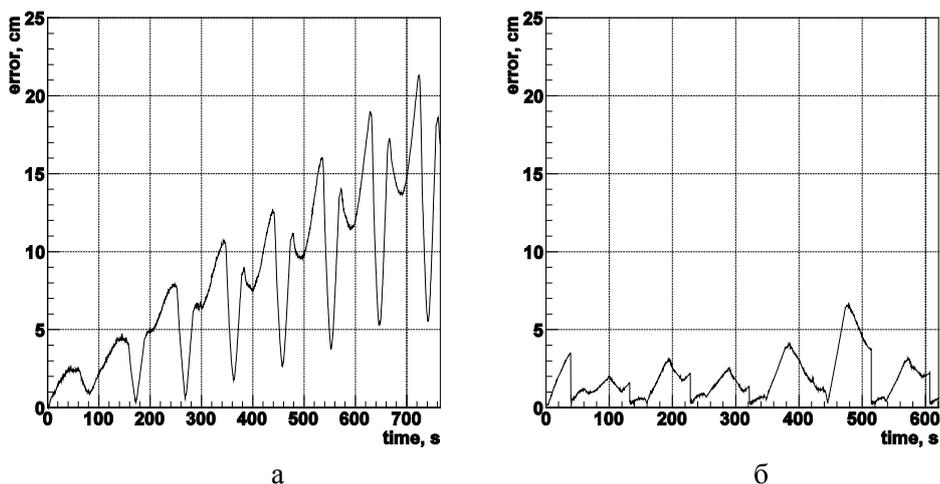


Рис.7. Ошибка навигации в зависимости от времени: а - без коррекции, б – с коррекцией

## 6. Заключение

Представлен алгоритм оценивания координат робота по моноизображениям от отдельных навигационных меток, получаемым во время движения с помощью жестко закрепленной на роботе видеокамеры. Алгоритм основан на комплексировании данных локальной системы

навигации и системы технического зрения робота с применением расширенного фильтра Калмана. Результаты экспериментов подтверждают эффективность предложенного подхода.

### **Литература**

1. *Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А.* Управление траекторным движением группы мобильных роботов: моделирование и эксперимент // В кн. Материалы X Международной конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2010)”, Новосибирск, с. 101-106, Россия: 2010.
2. *Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Нестеров А.А.* Децентрализованное управление подвижными объектами в составе маневрирующей группы // Автометрия, №3, С. 31-39, 2007.
3. *Котов К.Ю., Мальцев А.С., Соболев М.А., Филиппов М.Н.* Совместное использование одометрии и системы технического зрения для оценки координат мобильного робота. // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», (15-17 июня 2011г., Самара, Россия). – Самара: Изд. Самарский научный центр РАН, 2011. С. 230-236.
4. *Платонова М.В.* Использование шумоподобных сигналов ИК-диапазона для системы навигации мобильных роботов // Сб. Мобильные роботы и мехатронные системы, М.: Изд-во Моск. Ун-та, с. 148-155, 2009.
5. *Bloom B.C.* Use of Landmarks for Mobile Robot Navigation // SPIE vol. 579, Intelligent robot and Computer Vision, pp. 351-355, 1985.
6. *Crowley J.L.* Control of Translation and Rotation in a Robot Vehicle // In Proc. IEEE Conference on Robotics and Automation, May 1989.
7. *Harrison A., Newman P.* High Quality 3D Lazer Ranging Under General Vehicle Motion // In Proc. Of ICRA’ 2008, pp. 7-12.
8. *Leonard J.J., Durrant-Whyte H.F.* Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot // IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS ’91. Nov. 3-5, 1991. Osaka, Japan, pp. 1442-1447.
9. *Martin S., Stefan J.* Proprioceptive Navigation, Slip Estimation and Slip Control for Autonomous Wheeled Mobile Robots // IEEE RAM, Bangkok, Thailand, pp. 109-114, 2006.
10. *Mondada F., Bonani M., Raemy X., Pugh J., Cianci C., Klaptocz A., Magnenat S., Zufferey J.-C., Floreano D., Martinoli A.* The e-puck, a Robot Designed for Education in Engineering // Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, 1(1), pp. 59-65, 2009.