

## **ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОДОМЕТРОВ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

### **Введение**

Одной из важнейших задач в робототехнике является задача определения точного местоположения робота – проблема локализации или позиционирования. Данная проблема очень важна, так как информация о точном местоположении робота необходима для решения более сложных и комплексных задач навигации, построения пути и построения карты окружающей среды. На сегодняшний день существует несколько различных подходов к решению проблемы локализации. Эти подходы применяют различные сенсоры и алгоритмы обработки данных. Так, один из подходов к локализации основан на анализе данных сенсоров пройденного расстояния и описан в [1], вероятностный подход к локализации и картографированию на основе SLAM-методик с использованием лазерного сканера или дальномеров представлен в [2]. Любые методы оценки позиции робота имеют погрешности, обусловленные различными факторами физической среды. Для оценки этих погрешностей и уточнения реальной позиции робота на данный момент также существуют различные методики. Так, в [3] рассмотрен подход на основе расчета матриц ковариации, метод оценки ошибки одометров на основе данных навигации мобильного робота представлен в [4]. Классической в данной области является работа [5], где разработана методика калибровки и коррекции погрешности одометров, предложены методы проведения эксперимента для оценки различных факторов, влияющих на погрешность. В работе [6] выполнен сравнительный анализ нескольких различных подходов к оценке погрешности одометров, одним из которых является метод нейронных сетей. В работе применен многослойный персептрон для оценки ошибки одометров, который показал лучшие результаты из рассмотренных методов. Этим обусловлена актуальность исследований в области нейросетевых технологий оценки погрешностей сенсоров позиционирования.

### **1. Постановка задачи**

Основная цель исследований, описанных в данной статье, это повышение точности системы позиционирования реального мобильного робота на основе данных одометров с помощью методов искусственных нейронных сетей. Позиционирование робота на основе показаний одометров – наиболее дешевое и, таким образом, распространенное решение в робототехнике. Однако применение одометров для позиционирования робота в пространстве связано с проблемой

быстро накапливающейся погрешности, вызванной различными факторами. В данной работе анализируется влияние различных факторов для конкретного мобильного робота и производится оценка точности показаний одометров с помощью искусственных нейронных сетей. Отличием данной работы от предыдущих работ, рассмотренных выше, являются:

- исследование различных структур нейронной сети для оценки погрешностей робота;
- исследование наилучших стратегий управления роботом для нейросетевой оценки погрешности одометров;
- использование мобильного робота с малыми линейными размерами (в 5 раз меньше чем в [6]). Это значительно повышает погрешности системы позиционирования из-за малой базы и массы робота, однако позволяет оценить качество применения нейросетевой методики.

## 2. Описание экспериментов

Традиционно для исследования ошибки одометров применяется метод UMBMark, предложенный в [5]. Этот метод основан на анализе движения робота по сторонам квадрата (сторона 4 м) и заключается в применении различных алгоритмов оценки качества этого движения. В данной работе ставились эксперименты над мобильным роботом малых размеров PololuBot (диаметр 12 см, рис.1), что усложняет применение метода UMBMark. Таким образом, для сбора данных при постановке экспериментов робот перемещался по прямой. Были проведены эксперименты для скоростей 0.2 м/с, 0.5 м/с, 0.7 м/с, время движения подбиралось таким образом, чтобы робот проезжал примерно 1,5 метра. При движении робота проводилось измерение показаний одометров с периодичностью в 200 мс, также фиксировалась конечная точка с помощью внешних измерений. На основе полученных данных рассчитывались восемь промежуточных позиций робота по данным одометров. Из данной информации формировались входные образы на нейронную сеть. Более подробно данный метод рассмотрен в 3-м разделе.

В процессе экспериментов был проведен анализ стратегий управления для выбора наилучшей с точки зрения нейросетевого метода оценки. В экспериментах применялись следующие стратегии управления:

**Калибровка скоростей колес.** Для уменьшения боковой ошибки был выполнен поиск значений скоростей колес, при которых достигается максимально прямолинейное движение. В результате были найдены пары значений для различных скоростей. Недостатком данной стратегии является сильное влияние неточностей механики на траекторию и результаты.

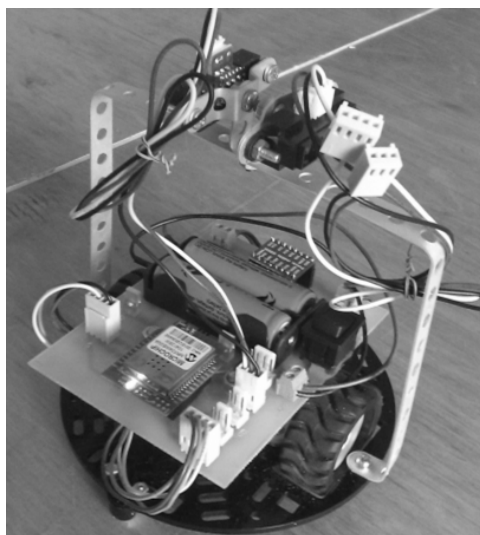


Рисунок 1 – PololuBot: диаметр 12 см, диаметр колеса 4.3 см, одометры, инфракрасные дальномеры, wifi связь

**ПИД-регулятор на оба колеса.** В этом варианте управление роботом проводилось с помощью алгоритмов пид-регуляции на каждом колесе. Результаты экспериментов показали сложность настройки такого решения, требований к мощности вычислительного процессора, что для малых роботов является существенным недостатком.

**ПИД-регулятор на одно колесо.** Наилучшая стратегия управления для малого робота с дифференциальной кинематической схемой. При использовании данного подхода были получены наилучшие результаты.

**Буксировка робота на холостом ходу.** Для оценки влияния электромоторов робота на ошибку одометров и прямолинейность движения был проведен эксперимент с буксированием робота на холостом ходу. В результате были выявлены независимые характеристики одометров и особенности программного обеспечения при работе с ними.

В результате поставленных экспериментов, калибровки и анализа погрешностей механики была установлена величина погрешности одометров, равная примерно 8-10%, зависящая в основном от качества покрытия пола.

### 3. Математическая модель ошибки одометров

В данной работе эксперименты проводились на роботе с дифференциальной кинематической схемой. Для расчета позиции робота были использованы оптические одометры с разрешающей способностью 12 отсчетов на оборот. Для расчета текущей позиции робота применялась математическая модель [7].

Пусть начальная и конечная позиции робота задаются следующими векторами:

$$P_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}, \quad P_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В процессе движения одометры позволяют получить мгновенные значения скорости левого и правого колеса  $v_l$ ,  $v_r$  соответственно. Если известен размер

колесной базы робота  $b$ , то связь между начальной, конечной координатой позиции робота и данными одометров имеет вид:

$$P_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_l + v_r}{2} \cos\left(\theta + \frac{v_l - v_r}{2b}\right) \\ \frac{v_l + v_r}{2} \sin\left(\theta + \frac{v_l - v_r}{2b}\right) \\ \frac{v_l - v_r}{b} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Данную зависимость можно представить через пройденное расстояние и полный угол  $\delta_{trans}, \delta_{rot}$  (рис. 2).

Выражения для пройденного расстояния и поворота имеют вид:

$$\delta_{rot} = \frac{v_l - v_r}{b} \quad (3)$$

$$\delta_{trans} = \frac{v_l + v_r}{2}$$

Таким образом, позиция робота, рассчитанная по данным одометров записывается как

$$\delta = (\delta_{rot}, \delta_{trans}).$$

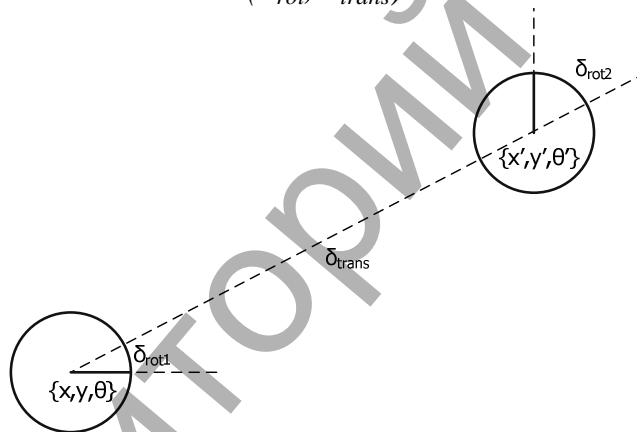


Рисунок 2 – Геометрическая модель движения робота

Погрешность, накапливаемая одометрами, имеет две основных составляющих: систематическую и случайную ошибку расчета. Причины, вызывающие систематическую погрешность позиционирования, – это недочеты при сборке механики и погрешности при проектировании узлов.

Случайные погрешности вызваны проскальзыванием колес и неровностями пола. Исходя из этого, полученные в результате подсчета позиция и угол поворота робота будут содержать в себе эти ошибки:

$$\hat{\delta}_{trans} = \delta_{trans} + \sigma_{trans}|d| + \varepsilon_{trans}, \quad (4)$$

$$\hat{\delta}_{rot} = \delta_{rot} + \sigma_{rot}|d| + \varepsilon_{rot} \quad (5)$$

где  $\delta_{trans}, \delta_{rot}$  – систематические ошибки при оценке пройденного расстояния и угла поворота робота, нарастающие с количеством пройденного расстояния  $|d|$ ;  $\varepsilon_{trans}$  и  $\varepsilon_{rot}$  – случайные ошибки расстояния и угла поворота;  $\hat{\delta}_{rot}, \hat{\delta}_{trans}$  – реальный пройденный путь и реальный угол поворота.

Приведенная выше модель использовалась в программных модулях для расчета координат робота по показаниям одометров. Из представленной модели видно, что ошибка одометров является нелинейной динамической системой.

#### 4. Архитектура нейронной сети

Сложная природа ошибки одометров и выраженное свойство к накоплению с течением времени обуславливает использование искусственных нейронных сетей как средства оценивания величины этой ошибки.

По результатам экспериментов был накоплен временной ряд координат робота, рассчитанных по данным одометров, а также связанные с этим рядом эталонные значения реальной позиции робота. Таким образом, задачей нейронной сети является аппроксимация нелинейной зависимости между данными одометров и реальными данными.

Для решения поставленной задачи был применен двухслойный перцептрон (рис. 3) с сигмоидной функцией активации в скрытом слое и линейными выходными нейронами. Количество нейронов входного слоя  $l = 18$  было выбрано исходя из данных, полученных в экспериментах. Данные сформировали образы из 18 элементов:

$$\{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_8, y_8, t_b, t_e\},$$

где  $x_1, y_1$  – пары координат робота по данным одометров,  $t_b, t_e$  – время старта и окончания движения.

Количество нейронов скрытого слоя  $k$  варьировалось в процессе экспериментов с нейронной сетью, выходной слой  $i$  содержит 2 нейрона, которые определяют координату робота  $x$  и  $y$  с учетом оценки погрешности нейронной сети.

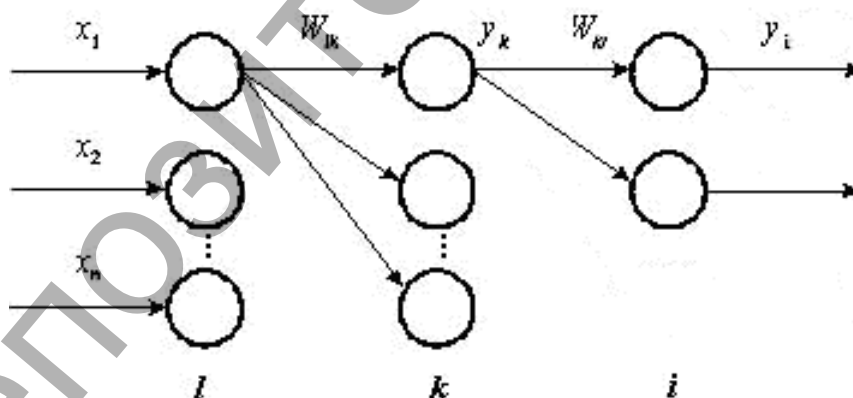


Рисунок 3 – Архитектура нейронной сети

Для обучения использовался метод обратного распространения ошибки. Значение суммарной среднеквадратичной ошибки нейронной сети рассчитывается по формуле:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L \sum_j (y_j^k - t_{1,2}^k)^2,$$

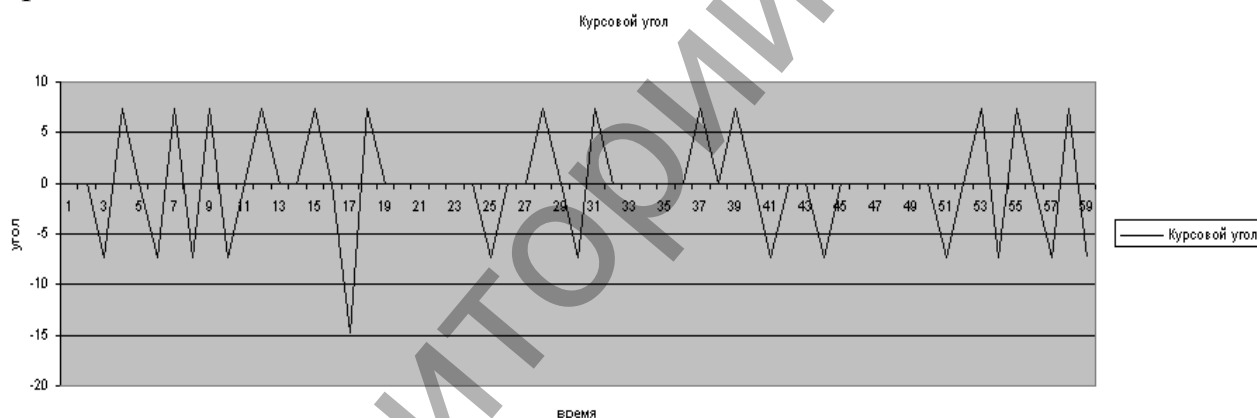
где  $L$  – размерность обучающей выборки,  $t_{1,2}$  – пара эталонных координат реальной позиции робота.

Для обучения нейронной сети в качестве эталонных значений использовались координаты реальной позиции робота. Реальная позиция робота оценивалась с помощью двух подходов – видеорегистрации робота с помощью камеры, закрепленной на потолке, и ручного измерения. Была осуществлена попытка измерения реальной позиции на основе инфракрасных дальномеров, но погрешности данных сенсоров не позволили сделать вывод о реальном качестве работы нейронной сети.

Для обучения нейронной сети была подготовлена обучающая выборка размера  $L = 131$  образ.

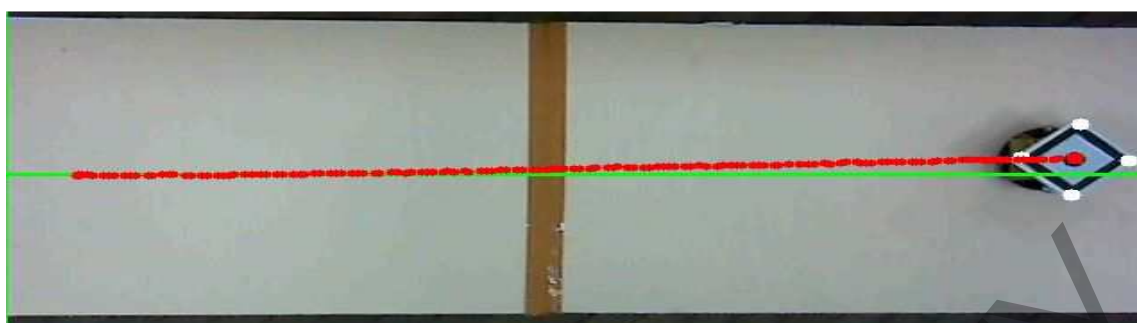
## 5. Результаты исследований

На основе полученных данных экспериментов было произведено исследование характеристик механики мобильного робота. Малые габаритные размеры робота (12 см X 12 см X 8 см), легкий вес (200 гр) приводят к существенному увеличению погрешностей курсового угла робота. Сильные колебания курсового угла, вызванные небольшой механикой, представлены на рис. 4. Они вызывают существенные погрешности в оценке позиции робота на основе одометров, гораздо больше чем в [6].

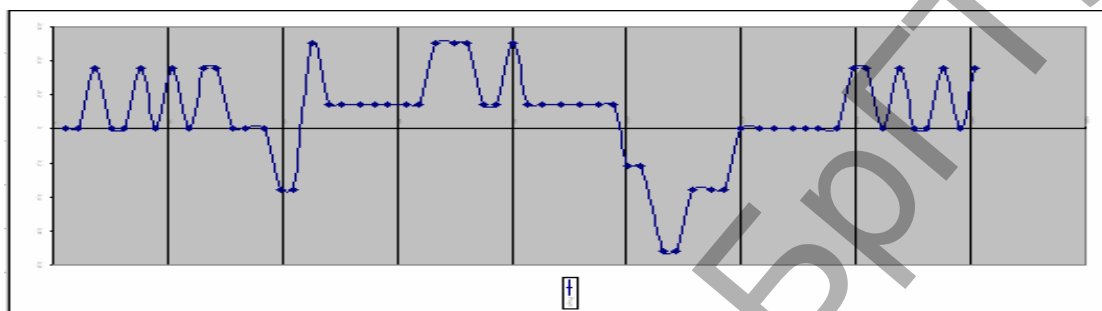


*Рисунок 4 – Колебания курсового угла (данные на основе показаний одометров)*

Для уменьшения погрешностей в движении мобильного робота, и выделения постоянной составляющей ошибки, в экспериментах для алгоритма управления было введено ПИД-регулирование одного из моторов колес, а также поверхность пола была покрыта специальным материалом. Это позволило существенно уменьшить случайную составляющую ошибки, выделив систематическую. Это позволило более точно готовить обучающую выборку нейронной сети. На рисунке 5б представлен путь робота, который сформирован на основе данных одометров. На рисунке 5а представлен путь робота, который зафиксирован с помощью видеодетектора. Ровная поверхность пола, отсутствие проскальзывания колес, плавное ПИД-регулирование позволяет говорить о том, что случайная составляющая ошибки в данном эксперименте значительно меньше, чем систематическая. На рисунке 4 наглядно видно, насколько неточны показания одометров в случае систематической ошибки.



a)



b)

a) реальный путь робота, б) путь робота на основе одометров

**Рисунок 5**

Первоначально в процессе обучения нейронной сети были произведены исследования влияния количества нейронов скрытого слоя на ошибку нейронной сети. Результаты данных исследований приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Результаты оценки погрешности одометров**

Номер эксперимента	Количество эпох обучения	Среднеквадратичная ошибка обучения НС	Количество нейронов в скрытом слое
1	125	0,08	6
2	21	0,079	6
3	23	0,065	8
4	45	0,021	8
5	20	0,085	10
6	15	0,044	10
7	18	0,081	12
8	32	0,072	12

Исходя из количества входных нейронных элементов и размерности обучающей выборки, количество нейронов в скрытом слое менялось в интервале 6-12 нейронов. При увеличении количества нейронов до 15, нейронная сеть запоминала входные образы и на новых данных показывала неудовлетворительные результаты. Из табл. 1 видно, что на данном интервале количество нейронных элементов не сильно влияет на качество обучения нейронной сети. В итоге для оценки погрешности одометров было выбрано количество нейронов, равное 8.

На рисунках 9 и 10 представлены результаты оценки нейронной сетью ошибки одометров по оси X и Y соответственно относительно реальной позиции робота.



Рисунок 6 – Аппроксимация ошибки одометров нейронной сетью



Рисунок 7 – Аппроксимация ошибки одометров нейронной сетью

С каждым экспериментом систематическая ошибка нарастает и ухудшается оценка нейронной сети. По координате Y заметное ухудшение происходит после 14 эксперимента, что соответствует примерно 200 метрам пройденного расстояния. Итоговый результат оценки погрешности одометров и погрешности нейронной сети приведен в таблице 2 в сравнении с работой [6], где использовался метод UMBMark и робот больших размеров. При примерно равной ошибке обучения нейронной сети относительная погрешность одометров в данных экспериментах выше, чем в [6], даже с учетом меньшего пройденного расстояния.

Таблица 2 – Сравнение результатов оценки погрешности одометров для различных размеров робота

	Результат	Результат J. Collins
Mean Square Error NN	0,165	0,17
Relative error	3,36%	1,20%
Dataset dimension	161	90
Robot dimension	6 см X 6 см	30 см X 30 см
Пройденное расстояние	1,7 м	5 м

Это согласуется с факторами, сильно влияющими на робота малых размеров. Однако в сравнении с погрешностью одометров (8-10%) относительная по-



грешность позиции робота по данным нейронной сети (3%) дает более точный результат. Уточнение позиции робота в три раза улучшит точность построения карты и навигации мобильного робота.

### **Выводы**

В результате проведенного исследования были получены характеристики механики для конкретного реального робота. На основании данных характеристик проведена калибровка подсистем управления и позиционирования робота для решения задачи локализации. Для уточнения позиции робота и повышения качества и надежности информации, выдаваемой подсистемой локализации, был предложен нейросетевой модуль. Результаты экспериментов доказали успешность предложенного подхода, особенно в продольном направлении, где ошибка наиболее существенна. Однако в данном подходе имеется ряд недостатков, таких как: необходимость настройки нейросетевого модуля для конкретного робота и окружающей среды, требование к производительности бортового оборудования робота, необходимость использования внешнего видеорегистратора для оценки реальной позиции робота. В дальнейшем для решения данных проблем планируется создание интеллектуальной системы позиционирования, которая смогла бы адаптироваться во время работы к параметрам робота, внешней среды и использовала для оценки позиции, кроме одометров, другие сенсоры робота.

### **Благодарности**

Данная работа выполнена при поддержке гранта Ф11-ЛИТ003 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и гранта ГБ 11/117 Министерства образования Республики Беларусь.

### **Литература**

1. D. Fox, W. Burgard, S. Thrun. Markov localization for mobile robots in dynamic environments, *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 1999, pp.11: 391-427.
2. M. Montemerlo, S. Thrun, D. Kollerand, B. Wegbreit. Fast-SLAM2.0: An Improved Particle Filtering Algorithm for Simultaneous Localization and Mapping that Provably Con-verges, In *Proc. Of the Int. Confs. On Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2003, pp.1151-1156.
3. L. Kleeman. Odometry Error Covariance Estimation for Two Wheel Robot Vehicles, *Technical Report MECSE-95-1*, Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University, 1995.
4. A. Martinelli, R. Siegwart. Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot during Navigation, In *Procs. Of European Conf. on Mobile Robots*, 2003.
5. J. Borenstein, L. Feng. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, pp.12(6):869-880.
6. Haoming Xu and John James Collins. Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot by Neural Networks, In *Proc. of International Conference on Machine Learning and Applications*, 2009.
7. R. Siegwart, I. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, The MIT Press, 2004.
8. Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330-1334, 2000.