

УДК 621.865.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.012](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.012)

Контроллер двигателя автономного мобильного робота с нейро-нечеткими управлением

Хан Мьо Хтун, А.Н. Якунин, Хтет Сое Паинг
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Москва, Российская Федерация

Резюме: В настоящее время автономный мобильный робот (МР) является искусственным интеллектуальным транспортным средством, который способен обходить препятствия и двигаться к заданной точке по заранее неопределённому маршруту. Во внешней среде одной из главных проблем является реализация передвижного мобильного робота на колесах, который перемещается из одной точки в другую с объездом препятствий. Такие роботы оснащены датчиками или камерой, поэтому МР должен быть способен обнаруживать возникающие препятствия. В этой статье предлагаются принципы построения интеллектуального контроллера на основе АСНЛ (адаптивная система нейро-нечеткой логики) автономного мобильного робота, позволяющие достигать цель по заранее неопределенному маршруту. Реализована математическая модель МР и разработанного контроллера в среде *Matlab-Simulink*. Сравнение предложенного контроллера с известным нечётким контроллером выполнено по следующим критериям: длина траектории (ДТ) и параметр кривизны (ПК). В данной статье результаты моделирования показывают, что предложенный АСНЛ-контроллер снижает ДТ и ПК по сравнению с контроллером с нечеткой логикой (НЛ), следовательно имеет лучшие показатели эффективности. Мобильный робот, использующий в своём составе предложенный контроллер АСНЛ способен двигаться к заданной цели и обходить случайные препятствия без столкновений на своем пути.

Ключевые слова: контроллер, адаптивная система нейро-нечеткой логики (АСНЛ), неопределенный маршрут, мобильный робот (МР), контроллер нечеткой логики (НЛ), длина траектории, параметр кривизны.

Для цитирования: Хан Мьо Хтун., Якунин А.Н., Хтет Сое Паинг. Контроллер двигателя постоянного тока с нейро-адаптивной нечеткой логикой управления. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/HanSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.012

Motor controller of an autonomous mobile robot with neuro-fuzzy control

Han Myo Htun, Alexey N. Yakunin, Htet Soe Paing
Department of Computer Engineering, National Research University "MIET",
Zelenograd, Moscow, Russian Federation

Abstract: Currently, an autonomous mobile robot (MR) is an artificial intelligent vehicle that can bypass obstacles and move to a given point along a predetermined route. In the external environment, one of the main problems is the implementation of a mobile robot on wheels, which moves from one point to another with a detour of obstacles. Such robots are equipped with sensors or a camera, so the MR should be able to detect emerging obstacles. This article proposes the principles of constructing an intelligent controller based on ASNL (adaptive system of neuro-fuzzy logic) of an autonomous mobile robot, allowing to achieve the goal along a predetermined route. The mathematical model of MR and the developed controller in the environment of *Matlab-Simulink* is implemented. Comparison of the proposed controller with a known fuzzy controller is performed according to the following criteria:

path length (DT) and curvature parameter (PC). In this article, the simulation results show that the proposed ASNL controller reduces DT and PC compared to a controller with fuzzy logic (NL), therefore it has better performance indicators. A mobile robot using the proposed ASNL controller is capable of moving toward a given target and avoiding random obstacles without collisions in its path.

Keywords: controller, adaptive system of neuro-fuzzy logic (ASNL), undefined route, mobile robot (MR), fuzzy logic controller (NL), distance traveled, curvature parameter.

For citation: Han Myo Htun, Alexey N. Yakunin. DC motor controller with neuro-adaptive fuzzy control logic. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/HanSoavtors_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.012 (In Russ).

Введение

В настоящее время область робототехники затрагивает различные сферы жизни человека. В робототехнике возникают разнообразные задачи, такие как ориентирование, коммуникация, передвижение и многие другие. Актуальным направлением исследований в области спасательной робототехники являются вопросы, связанные с повышением их автономности и интеллектуализации систем управления. В опасной зоне, подвергшейся поражению, проведение работ людьми практически невозможно. Поэтому одной из основных задач автономной навигации для мобильных роботов является обнаружение и объезд препятствий в процессе движения робота. В ходе анализа способов решения этой задачи были исследованы различные методы её реализации. Они подразделяются на методы, основанные на нечеткой логике, на применении нейронных сетей, с применением генетических алгоритмов или комбинирование нескольких из перечисленных.

В статье [1] предлагается адаптивная система нейро-нечеткого логического вывода (ANFIS) для решения задач навигации автономного наземного транспортного средства (AVG). В [2-4] исследуется применение адаптивной нейро-нечеткой логической системы (ANFIS) для генерации пути и объезда препятствий для автономного мобильного робота в реальной окружающей среде и предложено сравнительное исследование алгоритмов искусственного интеллекта, таких как нечеткая логика, нечеткая логика оптимизации роя частица (PSO) и нейро-нечеткая логика для навигации мобильного робота. В [5] приведен мобильный робот, который может делать обход препятствий в неизвестной среде с использованием контроллера нечеткой логики типа Сугено. Навигационный контроллер для мобильного робота с дифференциальным приводом,двигающийся в неизвестной среде с препятствиями, который оснащён ультразвуковыми датчиками, основан на адаптивной сетевой системе нечеткого вывода (ANFIS) [6]. Анализ опубликованных работ по теме исследования показал, что среди всех рассмотренных методов навигации, метод с АСНЛ оказался наиболее привлекательным. Теория АСНЛ основана на замечательной способности человека оперировать информацией, основанной на восприятии.

В данной работе разработана система управления мобильным роботом для объезда препятствий на его пути и достижения заданной финишной точки по заранее неопределённому маршруту с использованием АСНЛ-контроллера. Три датчика используются для измерения расстояния и угла ориентации до препятствий вокруг мобильного робота (MP). В работе будут решены следующие задачи: изучена модель MP, методы поиска цели и угла ориентации препятствия, рассмотрены АСНЛ-контроллер, реализованы математические модели выбранного контроллера в среде MATLAB-Simulink и выполнен их сравнительный анализ по длине пройденного пути и параметру кривизны траектории.

Математическая модель мобильного робота

Рассмотрим двухколёсный МР и его структуру, которая представлена на Рисунке 1(а), где X-Y – глобальные оси координат, а x_m - y_m - оси координат, которые связаны с роботом (с центром в точке p).

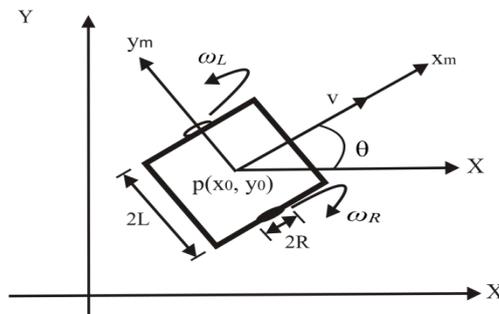


Рисунок 1(а) – Структура двухколесного робота
 Figure 1(a)– The structure of a two-wheeled robot

Как показано на Рисунке 1, робот имеет симметричную форму, а центр масс находится в его геометрическом центре p. Координаты этой точки в мировых координатах X-Y (x_0, y_0), а угол θ задаёт угловую ориентацию робота. В этой статье в динамике мобильного робота движение пассивных колёс игнорируется. Согласно схеме двухколесного мобильного робота, представленной на рис. 1[7], его кинетическое уравнение может быть записано как

$$V = r(\omega_l + \omega_R)/2 ; \quad (1)$$

$$\dot{x} = V \cos \theta ; \quad (2)$$

$$\dot{y} = V \sin \theta ; \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \omega = r(\omega_R - \omega_L)/2L , \quad (4)$$

где \dot{x} и \dot{y} задают скорость робота в направлении оси X и оси Y соответственно.

V обозначает линейную скорость робота в направлении движения робота (ось x_m)

$\dot{\theta} = \omega$ задаёт угловую скорость вращения робота (по часовой или против часовой стрелки).

L - расстояние от центров колёс до центра робота.

$vL = R\omega_L$ и $vR = R\omega_R$ - линейные скорости левого и правого колёс соответственно.

R - радиус колеса,

ω_L и ω_R - угловые скорости левого (лкс) и правого колёс (пкс) соответственно.

Структурная схема двухколёсного МР в MATLAB Simulink показана на Рисунке.1 (б). Набор дифференциальных уравнений (2-4) используется для определения положения и ориентации автономного мобильного робота. Движение робота задаётся его линейной скоростью v и угловой скоростью ω , которые являются функциями времени. Приведённые выше уравнения используются для построения модели автономного мобильного робота, в которой моделирование выполняется с использованием блоков инструментов Simulink в MATLAB.

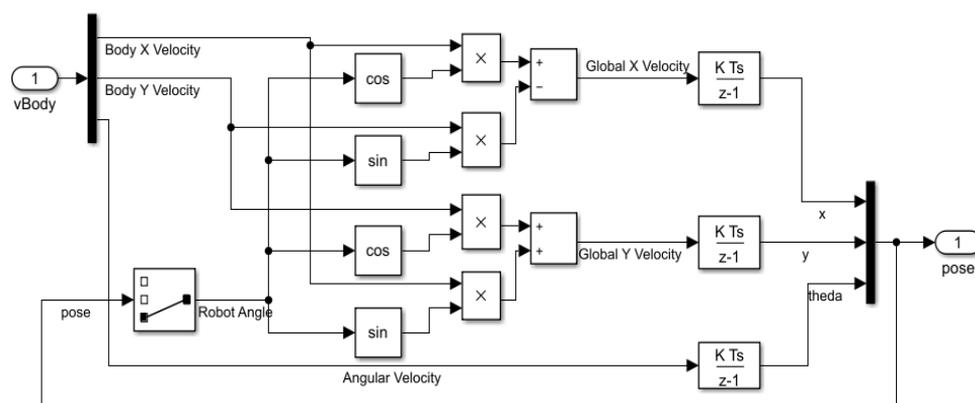


Рисунок 1(б) – Структурная схема двухколесного мобильного робота в MATLAB Simulink
Figure 1(b)– Block diagram of a two-wheeled mobile robot in MATLAB Simulink

Поведение МР в поисках цели: в этой статье предлагается нейро-нечеткая управляющая структура для управления двухколесным роботом, для эффективно перемещения в желаемую точку. Робот имеет две степени свободы в своем относительном положении и ориентации, поэтому положение робота может быть представлено вектором (x_0, y_0, θ) . Используя колёсные двигатели, робот должен регулировать направление своего движения и двигаться к цели, так как он «знает» текущую позицию и способен находить направление на цель. Расстояние между роботом и его пунктом назначения

$$d_1 = \sqrt{(y_d - y_0)^2 + (x_d - x_0)^2}, \quad (5)$$

где (x_0, y_0) и (x_d, y_d) - текущее и желаемое (целевое) положения робота соответственно.

d_1 - расстояние между текущей позицией (x_0, y_0) и желаемой позицией (x_d, y_d) робота. Робот также должен регулировать свою ориентацию в процессе движения к цели. Предположим, что угол между осью X и направлением движения робота равен θ ; (θ_T) - угол между направлением робота и целью. Таким образом, чтобы изменить направление к цели, угол движения должен быть изменен на значение φ_1 :

$$\varphi_1 = \theta_T - \theta, \quad (6)$$

$$\theta_T = \tan^{-1}[(y_d - y_0)/(x_d - x_0)], \quad (7)$$

Принцип ориентации мобильного робота: для ориентации мобильного робота предлагается использовать три датчика для измерения расстояния и угла ориентации препятствий. Рассмотрим двухколёсный МР с тремя датчиками, который представлен на Рисунок 2. Считаем, что ультразвуковые датчики способны измерять расстояние между роботом (датчиком) и препятствиями (d_2):

$$d_2 = vt/2, \quad (8)$$

где v - скорость сигнала; t - время, прошедшее от датчика до объекта.

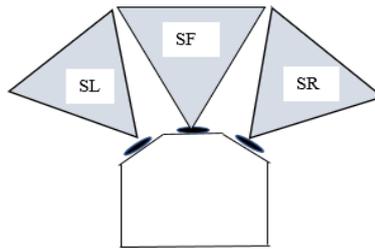


Рисунок 2 – Схема мобильного робота с тремя датчиками
 Figure 2 – The scheme of a mobile robot with three sensors

Пусть SL – измеренное расстояние от препятствия до левого датчика; SF – от препятствия переднего датчика; SR – от препятствия до правого датчика; Ld – предельное расстояние.

- Если $(SL < Ld)$ или $(SL < Ld \ \& \ SF < Ld)$, робот вращается по часовой стрелке (чс).
- Если $(SF < Ld)$, робот вращается по чс или против часовой стрелки (пчс), потому что это условие зависит от положения цели, существующей справа или слева от робота.
- Если $(SR < Ld)$ или $(SR < Ld \ \& \ SF < Ld)$, робот вращается пчс.

Пусть DT – длина траектории, проложенной мобильным роботом от начальной позиции (x_i, y_i) до целевой позиции (x_N, y_N) . DT можно рассчитать, как [8]

$$DT = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2}, \quad (9)$$

где (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$) – N точек траектории в координатах.

Пусть **ПК (Параметр Кривизны)** – это функция кривизны k , используемая для оценки плавности траектории робота. $ПК$ можно рассчитать, как сумму квадратов локальной кривизны в каждой точке линии $k(x_i, y_i)$ вдоль длины линии движения. $ПК$ траектории движения робота может быть выражено как [6]:

$$ПК = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k^2(x_i, f(x_i)), \quad (10)$$

где $k(x_i, y_i)$ – кривизна в каждой точке траектории робота, а N – количество точек на траектории.

Адаптивный нейро-нечеткий контроллер

В настоящее время известны нейро-нечёткие способы моделирования и адаптивного управления нелинейными системами [9]. Адаптивная нейро-нечеткая система комбинирует обучающую способность нейронной сети с представлением знаний нечеткой логики. Нейро-нечеткие методы возникли в результате слияния искусственных нейронных сетей (ИНС) и систем нечеткого вывода (НВ) и стали популярными для решения реальных проблем. Нейро-нечеткая система основана на нечеткой системе, которая обучается по алгоритму, основанному на теории нейронных сетей. Контроллер адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (АСНЛ) наследует преимущества вышеуказанных подходов контроллеров НВ и ИНС [10]. Модель АСНЛ на основе Такаги-Сугено – это модель с несколькими входами и одним выходом.

Каждая модель АСНЛ имеет пять входов и один выход. Таким образом, для двух выходов (скорости левого и правого колес) были реализованы два контроллера АСНЛ. Структура контроллера АСНЛ содержит два входа и один выход в соответствии с системой нечеткого вывода Такаги-Сугено. На Рисунках. 3(а) и (б) представлены

структура контроллера АСНЛ с системой ввода/вывода и блок-схема МР с контроллером АСНЛ, спроектированная в среде *MATLAB Simulink*. Предлагаемый контроллер АСНЛ имеет пять входов и два выхода для скорости колес. На Рисунке. 4 отражена типичная архитектура АСНЛ-контроллера.

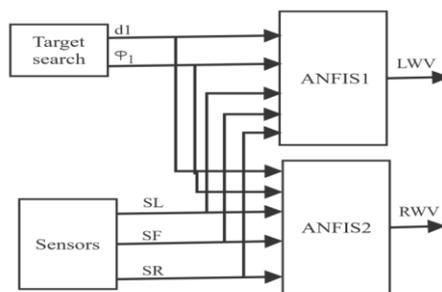


Рисунок 3(а) – Структура контроллера АСНЛ с системой ввода/вывода
 Figure 3(a) – ANFIS controller structure with input / output system

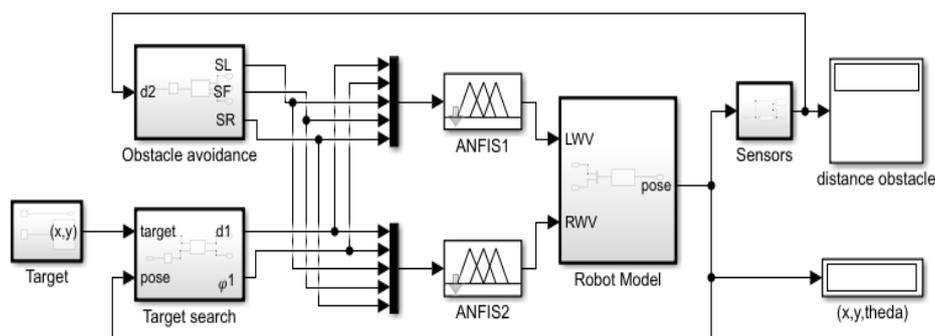


Рисунок 3(б) – Блок-схема МР с контроллером АСНЛ в *MATLAB Simulink*
 Figure 3(b) – Block diagram of MP with ANFIS controller in *MATLAB Simulink*.

В работе предлагается правило функционирования предлагаемого контроллера АСНЛ, которое может быть сформулировано следующим образом:

$$\text{Если } x_1 = A_i, x_2 = B_i, x_3 = C_i, x_4 = D_i, x_5 = E_i, \text{ то } f_n = o_n x_1 + p_n x_2 + q_n x_3 + r_n x_4 + s_n x_5 + u_n$$

где A_i, B_i, C_i, D_i и E_i - наборы нечетких функций принадлежности для входных переменных $x_m, m = 1, 2, \dots, 5$; соответственно. $i = 1: 3$ и o_n, p_n, q_n, r_n, s_n и u_n - линейные параметры функции скорости вращения колеса f_n ; Эти параметры управляют выходом контроллера АСНЛ.

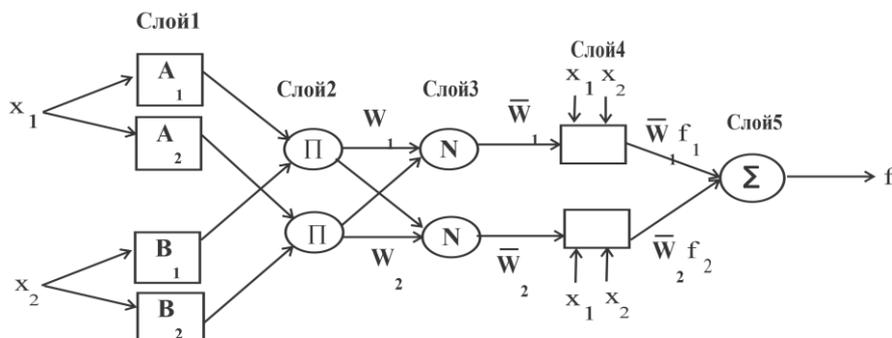


Рисунок 4 – Архитектура АСНЛ в соответствии с системой нечеткого вывода Такаги-Сугено
 Figure 4 – ANFIS architecture in accordance with the Takagi-Sugeno fuzzy inference system

Структуру АСНЛ-контроллера можно описать как сеть, состоящую из 5 слоёв:

Слой 1: Каждый адаптивный узел в этом слое генерирует оценки принадлежности для входных векторов A_i , $i = 1, 2, 3$ в рассматриваемой архитектуре. Функция узла _ это треугольная функция принадлежности:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(e) = \begin{cases} 0, e \leq a_i \\ \frac{e - c_i}{b_i - c_i}, a_i \leq e \leq b_i \\ \frac{c_i - e}{c_i - b_i}, b_i \leq e \leq c_i \\ 0, c_i \leq e \end{cases} \quad (11)$$

Слой 2: в этом слое имеется 48 правил. Каждый выходной узел является произведением всех входящих узлов и задается в следующем уравнении:

$$O_i^2 = W_i = \min(\mu_{A_i}(e), \mu_{B_i}(e)), i = 1, 2, 3. \quad (12)$$

Слой 3: Фиксированный узел i в этом слое рассчитывает отношение уровня активации i -го правила к сумме всех уровней активации:

$$O_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (13)$$

Слой 4: Адаптивный узел i на этом уровне вычисляет вклад i -го правила в общий выходной результат с помощью следующей функции узла:

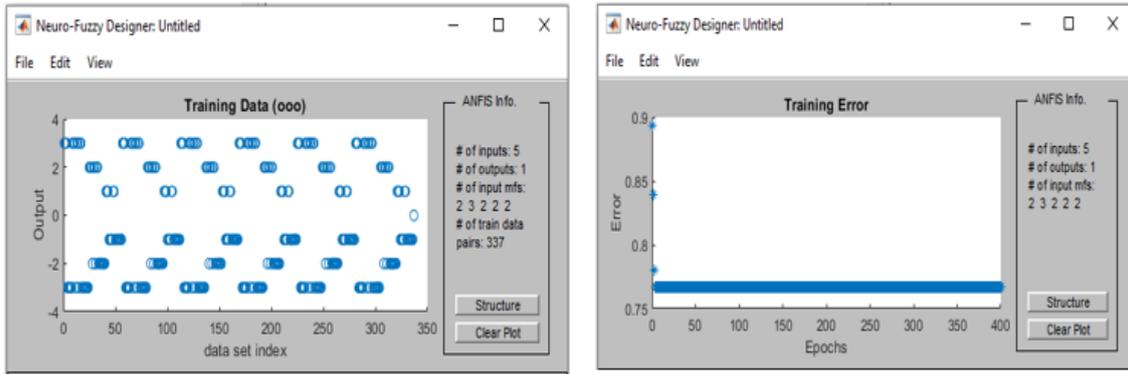
$$O_i^4 = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i (o_i x_1 + p_i x_2 + q_i x_3 + r_i x_4 + s_i x_5 + u_i) \quad (14)$$

Слой 5: Единственный неподвижный узел в этом слое вычисляет общий вывод, как и суммирование вклада каждого правила:

$$O_i^5 = \sum_i \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad (15)$$

Обучаемые Обучаемый параметр _ это $(a_i, b_i$ и c_i и) предпосылки и $(o_i, p_i, q_i, r_i, s_i$ и $u_i)$ последовательных параметров. Алгоритм обучения требует обучающий набор, определенный между входами и выходами [11]. В ходе разработки контроллера АСНЛ для его обучения была использована 400 выборок обучающих наборов данных. Набор данных, полученный в результате обучения, используется для построения контроллера АСНЛ. Набор лкс и пкс обучающих данных контроллера АСНЛ показан на Рисунках 5 (а и в). Для лкс и пкс обучения набора данных использовался гибридный метод.

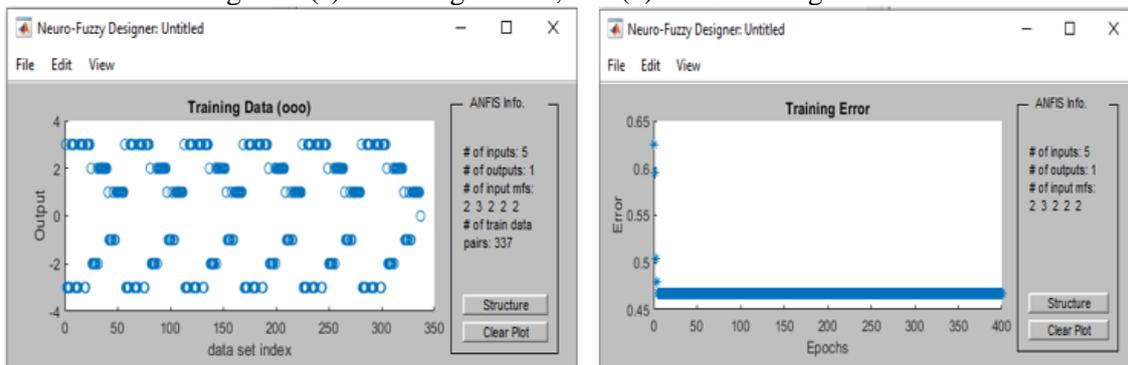
Среднеквадратическая ошибка обучения (RMS), полученная после обучения набора данных контроллера АСНЛ, составила 0,768 (для лкс) и 0.468 (для пкс). Ошибка данных обучения RMS в зависимости от количества тренировочных эпох показана на Рисунках 5 (б и г). Было реализовано 400 эпох обучения. Количество правил составляет 48 ($2 \times 3 \times 2 \times 2 = 48$). Поэтому разработанный АСНЛ-контроллер содержит в общей сложности 321 подходящих параметров.



(а)

(б)

Рисунок 5 (а)– Набор данных для обучения и (б) Ошибка данных обучения RMS
 Figure 5 (a)– Training dataset; and (b) RMS training data error



(в)

(г)

Рисунок 5 (в)– Набор данных для обучения и (г) Ошибка данных обучения RMS
 Figure 5 (c)– Training dataset; and (d) RMS training data error

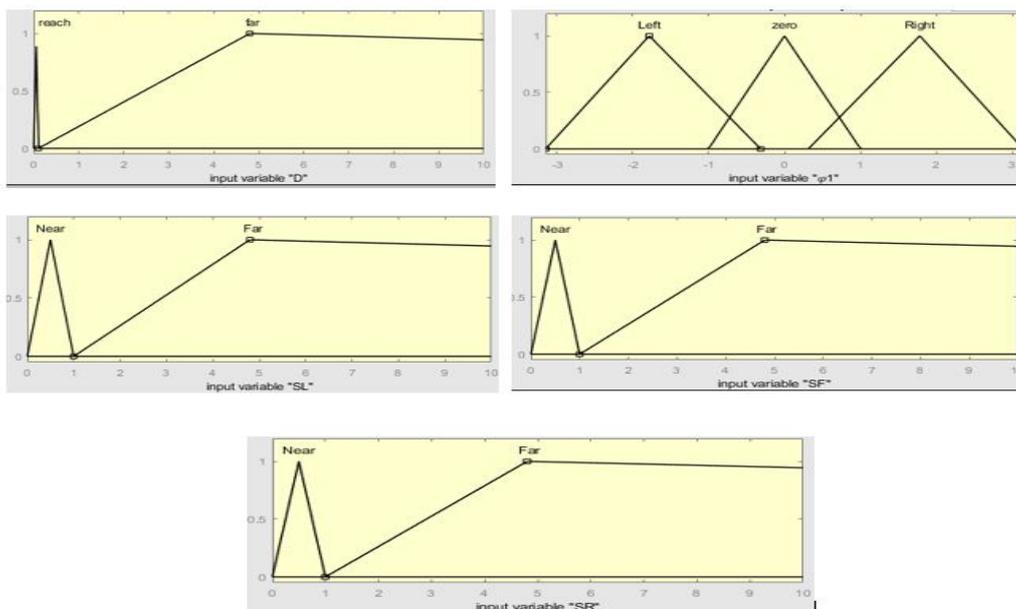


Рисунок 6(а) – Функция принадлежности для d_1 , φ_1 , SL, SF и SR после обучения
 Figure 6(a) – Membership function for d_1 , φ_1 , SL, SF and SR after training

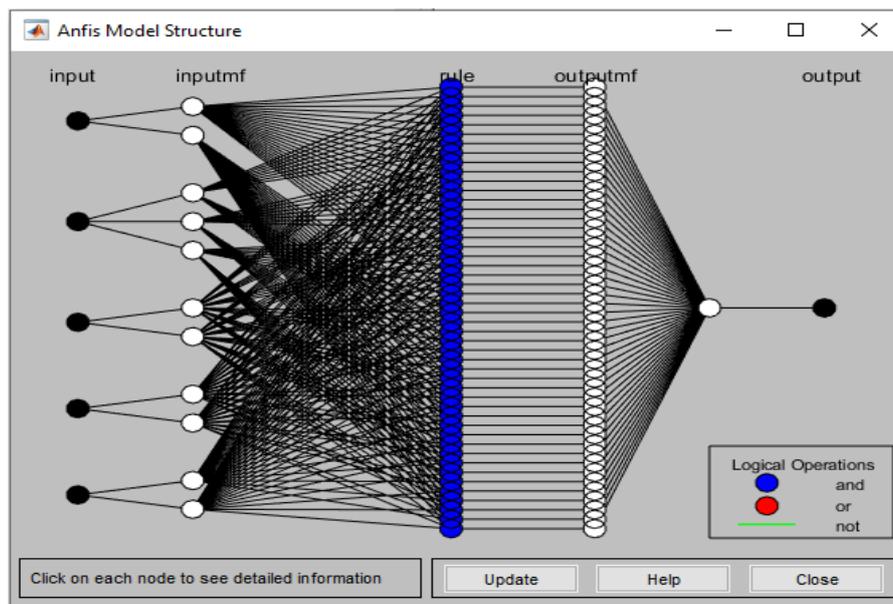


Рисунок 6(б) – Структура модели АСНЛ
 Figure 6(в) – Structure of the ANFIS model

Задача автономного мобильного робота состоит в том, чтобы иметь возможность построить путь без столкновения при движении к цели по заранее неопределенному маршруту. В этой системе два контроллера используются для управления ориентацией МР, когда МР находится вблизи препятствия. Каждый АСНЛ имеет пять входов, которые представляют собой d_l , φ_l , SL , SF и SR и один выход, который представляет собой правую или левую угловую скорость. Уравнения (5) и (6) используются для расчета входных расстояний (d_l) и угла (φ_l) между роботом и целями. Три датчика определяют левую, правую и переднюю дистанции между роботом и возможными препятствиями. Выходные данные контроллеров АСНЛ – это левая и правая угловые скорости. Каждый контроллер регулирует скорость робота (влево или вправо) в зависимости от расстояния между препятствиями и текущей позиции автономного МР. (Например: ЕСЛИ (целевые расстояния (d_l) находятся далеко, а целевой угол (φ_l) слева, SL - далеко, SF - близко, а SR - далеко, ТО (скорость левого колеса: вперед и скорость правого колеса): назад).

Результаты

При разработке контроллера АСНЛ использовался пакет «*MATLAB Fuzzy Logic Toolbox*» и функция “*anfisedit*”. Производительность предлагаемого контроллера сравнивалась с НЛ [12] по двум параметрам: ДТ и ПК. Тестирование контроллеров АСНЛ, внедрённых в автономный мобильный робот было выполнено с использованием различных путей. На Рисунке 7, 8 и 9 ((а) и (б)) представлены два частных случая движения мобильного робота для достижения цели на разных окружающих средах (ОС). Скорость робота зависит от его расстояния, угла между роботом и целью, а также от препятствий и вычисляется контроллером.

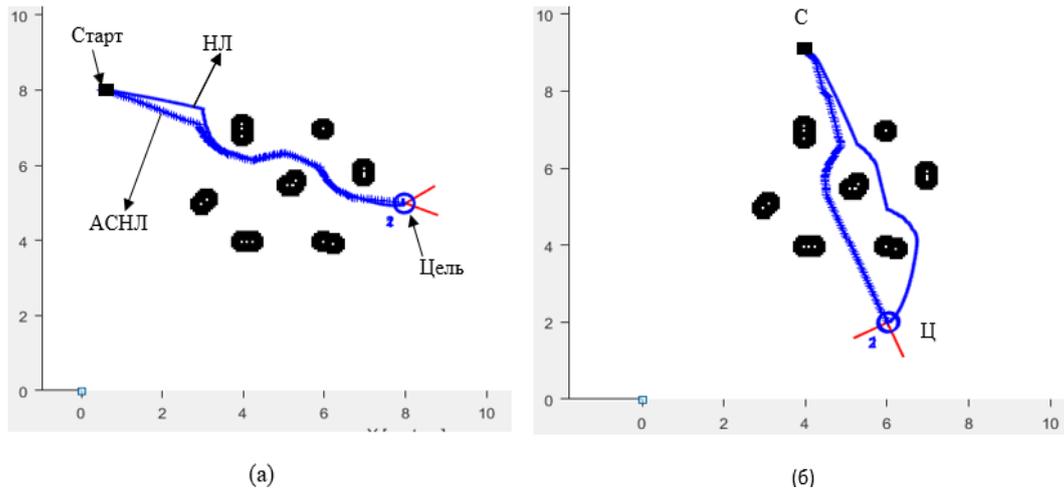


Рисунок 7 (а и б)– Достижение целей с препятствиями на пути следования робота на ОС-1
Figure 7(a & b) – Achieving goals with obstacles in the path of the robot on OS-1

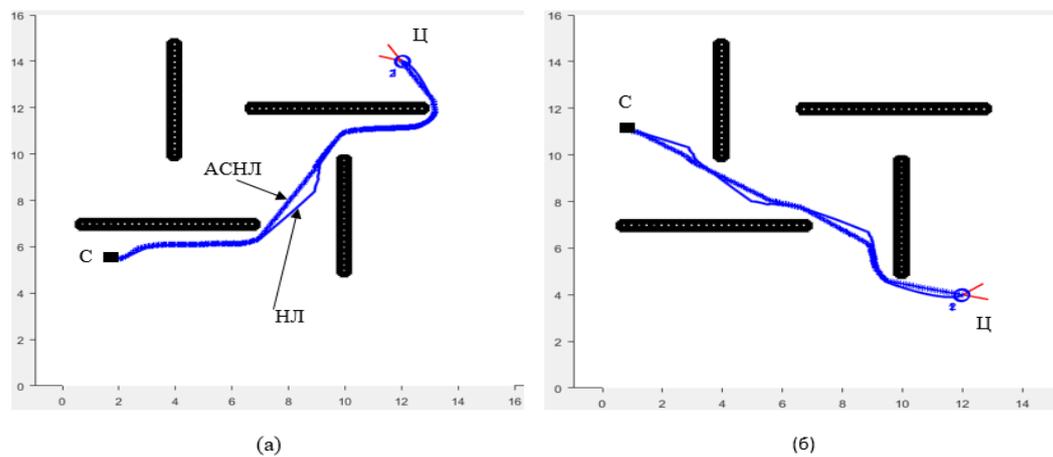


Рисунок 8 (а и б)– Достижение целей с препятствиями на пути следования робота на ОС-2
Figure 8 (a & b) – Achieving goals with obstacles in the path of the robot on OS-2

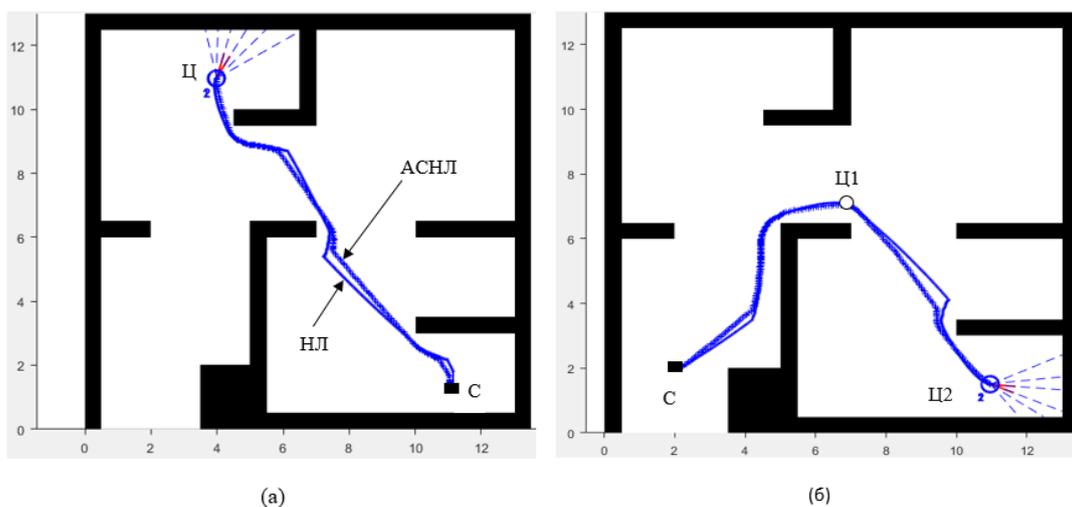


Рисунок 9 (а и б)– Достижение целей с препятствиями на пути следования робота на ОС-3
Figure 9 (a & b) – Achieving goals with obstacles in the path of the robot on OS-3

ОС-1 (сценарий(С1) (а) и (б)): начальное положение (нп) (0.5, 8), целевое положение(цп) (8, 5) и нп (4, 9), цп (6, 2). ОС-2 (С2(а) и (б)): нп (2, 5.5), цп (12, 14) и нп (1, 11), цп (12, 4). ОС-3 (С3(а) и (б)): нп (11, 1.5), цп (4, 11) и нп (2, 2), положение двух целей (7, 7 и 11, 1.5). В данной работе эффективность контроллеров проанализированы по следующим критериям: ДТ, ПК и время достичь цели (ВДЦ) (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты моделирования работы контроллеров - ДТ, ПК и ВДЦ

Table 1- The results of the simulation of the controllers - DT, PC and VDC

Окружающих средах (ОС)		ДТ		ПК		ВДЦ	
		НЛ [12]	АСНЛ	НЛ [12]	АСНЛ	НЛ [12]	АСНЛ
ОС-1	С1(а)	9.8(м)	9.1(м)	0.026	0.024	8.85(с)	7.95(с)
	С1(б)	9.1	8.3	0.038	0.018	7.80	6.95
ОС-2	С2(а)	17.3	16.1	0.027	0.021	21.85	21.15
	С2(б)	15.1	14.1	0.031	0.017	13.15	11.95
ОС-3	С3(а)	13.7	12.9	0.26	0.022	12.65	11.55
	С3(б)	16.2	15.1	0.027	0.024	15.30	14.25

Анализ таблицы показывает, что на всех сценариях МР, основанный на контроллере АСНЛ достигает цель за меньшее время, чем МР, использующий контроллер НЛ. Во всех сценариях робот движется к конечной точке с приемлемой скоростью по сравнению с известными существующими контроллерами.

Заключение

Применение АСНЛ является рациональным решением при разработке контроллера, позволяющего мобильному роботу объезжать препятствия на его пути и достигать заданной финишной точки по заранее неопределённому маршруту. Этот контроллер формирует для мобильного робота удовлетворительные параметры движения в реальном времени с тем, чтобы он благополучно достиг цели без столкновений на своём пути. Результаты моделирования работы предложенного АСНЛ контроллера представлены для иллюстрации осуществимости задачи и оценки его эффективности. Результаты моделирования демонстрируют, что АСНЛ-контроллер позволяет повысить эффективность системы управления МР за счёт уменьшения длины траектории и параметра кривизны по сравнению с другим известным НЛ контроллером.

Предложенное решение применимо при построении роботов, которые могут быть использованы в таких областях как медицина, образование, сельское хозяйство и помощь инвалидам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одей Аль-Майяхи, Уильям Ван и Фил Берч. Адаптивная нейро-нечеткая техника для автономной навигации наземного транспортного средства. Робототехника 2014;2218-6581(3):349-370.
2. Юсиф Аль Мешхедани. Гибридный контроллер ANFIS для 6-DOF манипулятора с 3D-моделью. Международный журнал компьютеров и технологий. 2013; 4 (2): 631-

638. К. П. Моханти и Р. П. Даял. Навигация автономного мобильного робота с использованием адаптивной сетевой системы нечеткого вывода. Журнал механических наук и технологий. 2014;28(7):2861-2862.
3. Ким Ч.Д., Чва Д. Метод обхода препятствий для мобильных колесных роботов с использованием нечеткой нейронной сети с интервалом типа 2. IEEE Trans Fuzzy Syst. 2015;23(3):677-687.
 4. Алгабри этал. (2015) предложили сравнительное исследование алгоритмов искусственного интеллекта, таких как нечеткая логика, нечеткая логика оптимизации роя частиц (PSO) и нейрофаззи для навигации мобильного робота.
 5. Нерендра Кумар и Золтан В Амосси. Навигация робота с обходом препятствий в неизвестной среде. Международный журнал техники и технологий 2017;(5):1-7.
 6. Панати Суббаш, Кил. То Чонг. Адаптивный сетевой навигационный контроллер на основе системы нечеткого вывода для мобильного робота. Subbash и Chong / Front Inform Technol Electron Eng 2019;20(2):141-151.
 7. Чинг Вонг, Ши Ан Ли, Чи Тай Чен, Хой И Ван. Нечеткий контроллер, разработанный GA для двухколесных мобильных роботов. Международный журнал нечетких систем. 2007;9(1):22-30.
 8. Guo Y, Qu ZH, Wang J. Новый планировщик движения, основанный на характеристиках, для неголономных мобильных роботов. Proc 3rd Представление Metrics для семинара по интеллектуальным системам. 2003:1-8.
 9. Джайн М., Сингх М., Чандра А., Уильямсон С. С. Управление без датчика синхронного двигателя с постоянными магнитами с использованием MRAS на основе ANFIS. Международная конференция электрических машин и приводов (IEMDC). 2011:599-606.
 10. Yaguo. Ле, Амира Й., Хайкал, Файз Ф. Арид. Диагностика неисправностей вращающихся механизмов на основе нескольких комбинаций ANFIS с GA. Механические системы и обработка сигналов. 2007:2280-2294.
 11. Джих-Шинг Роджер Джанг. Адаптивные сетевые системы нечеткого вывода. IEEE Транзакции по системам человек и кибернетика. 1993;23(3):665-683.
 12. Хан Мио Хтун, Алексей Львович Переверзев, Аунг Мио Сан, Хант Вин. Автономное управление движением мобильного робота по неопределенному маршруту. IEEE Конференция российских молодых исследователей в области электротехники и электроники (EIconRus). 2020;2360-2364.

REFERENCES

1. Auday Al-Mayyahi, William Wang and Phil Birch. Adaptive Neuro-Fuzzy Technique for Autonomous Ground Vehicle Navigation. Robotics 2014;2218-6581(3):349-370.
2. К. Р. Mohanty and R. P. Dayal. Navigation of antonomous mobile robot using adaptive network based fuzzy inference system. Journal of Mechancial Science and Technology. 2014;28(7):2861-2862.
3. Kim CJ, Chwa D. Obstacle avoidance method for wheeled mobile robots using interval type-2 fuzzy neural network. IEEE Trans Fuzzy Syst. 2015;23(3):677-687.
4. Algabri etal. (2015) proposed a comparison study of artificial intelligence algorithms, such as fuzzy logic, particle swarm optimization (PSO) fuzzy logic, and neurofuzzy for mobile robot navigation.
5. Neerendra Kumar1 and Zoltan V amossy. Robot navigation with obstacle avoidance in unknown environment. International Journal of Engineering & Technology 2017;(5):1-7.

6. Panati SUBBASH, Kil Too CHONG. Adaptive network fuzzy inference system-based navigation controller for mobile robot. Subbash and Chong / Front Inform Technol Electron Eng 2019;20(2):141-151.
7. Ching Wong, ShihAn Li, Chi Tai Cheng, Hoi Yi Wang. Fuzzy controller designed by GA for two-wheeled mobile robots. International Journal of Fuzzy Systems. 2007;9(1):22-30.
8. Guo Y, Qu ZH, Wang J. A new performance-based motion planner for nonholonomic mobile robots. Proc 3rd Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. 2003:1-8.
9. Jain, M., Singh, M., Chandra, A., Williamson, S.S. Sensor less Control of Permanent Magnet Synchronous Motor using ANFIS Based MRAS. International Electric Machines& Drives Conference (IEMDC). 2011;599-606).
10. Yaguo. Le, Amira Y. Haikal, Fayz F. Areed. Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs. Mechanical Systems and Signal Processing. 2007;2280-2294).
11. Jyh-Shing Roger Jang. Adaptive network based fuzzy inference systems. IEEE Transactions on systems man and cybernetics. 1993;23(3):665-683.
12. Han Myo Htun, Alexey L. Pereverzev, Aung Myo San ,Khant Win. Autonomous Mobile Robot Motion Control in Undefined Route. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2020;2360-2364.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хан Мьо Хтун, аспирант, кафедра «Вычислительной Техники», Институт Микроприборов и Систем Управления (МПСУ), Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Российская Федерация.
e-mail: hanmyoe123htun@gmail.com

Han Myo Htun, Phd Student, Department Of Computer Engineering, National Research University (MIET), Zelenograd, Moscow, Russian Federation.

Якунин Алексей Николаевич, д.т.н., доцент профессор, кафедра «Вычислительной Техники», Институт Микроприборов и Систем Управления (МПСУ), Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Российская Федерация.
e-mail: yakunin.alexey@gmail.com

Alexey N. Yakunin, Dr. Tech. Sci., Professor, Department Of Computer Engineering, National Research University "Miet", Zelenograd, Moscow, Russian Federation.

Хтет Сое Паинг, аспирант, кафедра «САУиК системы автоматизированного управления и контроля», Институт Микроприборов и Систем Управления (МПСУ), Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Российская Федерация.
e-mail: htetsoepaing2@gmail.com

Htet Soe Paing, Phd Student, “Automated Control And Monitoring Systems” Department Of Computer Engineering, National Research University "MIET", Zelenograd, Moscow, Russian Federation.