М. В. Бобырь, д-р техн. наук, проф., fregat_mn@rambler.ru,
С. А. Кулабухов, аспирант, kulabuhov.sergei@yandex.ru,
А. С. Якушев, магистрант, alekseyakushev@yandex.ru,
Юго-Западный государственный университет, Курск

Нечеткая иерархическая система угловой ориентации мобильного робота. Часть I*

Представлена программно-аппаратная реализация автоматизированной системы управления угловой ориентацией мобильного робота. Описаны компоненты, входящие в структуру робота, и схема их подключения. Предложен алгоритм прохождения лабиринта роботом, основанный на анализе поступающей информации от его сенсоров. Для повышения интеллектуализации процесса управления роботом в его системе управления используются нечеткие вычисления, основанные на мягких арифметических операциях.

Ключевые слова: мобильный робот, ArduinoUno, ультразвуковой (HC-SR04) и инфракрасный (Sharp 2D120X) дальномеры, нечеткая логика, иерархическая нечеткая система управления, мягкие вычисления

Введение

Современная робототехника направлена на решение задач управления движением мобильных роботов в сложных условиях (например, в лабиринтах, на пересеченной местности), где трудность заключается в поиске путей объезда препятствий.

На практике используются несколько алгоритмов нахождения путей в лабиринтах, наиболее известный из них — алгоритм "правой руки", заключающийся в том, что робот, привязываясь к правой стенке, двигается вдоль нее и следит, есть ли проход справа. Если проход есть, он идет по нему, не отрываясь от стены. Если прохода нет — впереди стена — робот поворачивает налево. Если прохода снова нет, он еще раз поворачивает налево, таким образом разворачиваясь на 180°, и идет в обратном направлении. Основным недостатком данного подхода является то, что многосвязные лабиринты (такие, в которых существуют отдельно стоящие стенки и замкнутые маршруты) данным методом пройти нельзя [1].

Универсальным алгоритмом прохождения лабиринта считается алгоритм Люка—Тремо [2]. В нем отмечается каждая развилка лабиринта, и робот проходит все маршруты в прямом и обратном направлении, ориентируясь по отметкам на стенках лабиринта. Недостаток алгоритма заключается в том, что для его реализации необходимы дополнительные механизмы, позволяющие делать отметки и затем считывать их, что увеличивает сложность процесса принятия управляющих решений роботом.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-2983.2015.8.

В условиях прохождения лабиринта всегда присутствует неопределенная информация, т. е. нет заранее определенного маршрута и неизвестно число препятствий впереди робота. Поэтому применение нечеткой логики для алгоритмов поиска пути является актуальным решением. Ряд зарубежных ученых для решения данной задачи использовали алгоритмы на основе нечеткой логики. Однако они обладают рядом систематических ошибок, более подробно описанных в работах [3—5].

Авторами данной статьи для прохождения лабиринта роботом предлагается использовать систему принятия решений, основанную на нечеткой логике с использованием при операции глобальной агрегации мягких арифметических операций. Это позволит сделать поверхность отклика результирующей переменной более гладкой.

Функциональная схема мобильного робота и его элементы

Основными этапами разработки системы управления мобильным роботом являются создание робота, его программирование, настройка и тестирование функций, выполняемых им. Трудности в реализации вышеуказанных этапов заключаются в следующем:

1. Чем больше элементов (сенсоров, элементов системы технического (СТЗ) и т. п.) находится на роботе, тем он тяжелее. Следовательно, энергии, затрачиваемой на его движение, будет тратиться больше, что скажется на уменьшении времени автономной работы без подзарядки элементов питания [6]. Поэтому необходимо найти такой минимальный набор компонентов мобильного робота, который бы обеспечивал решение поставленных перед ним задач.

2. На сегодняшний день не существуют конкретные принципы и правила создания систем управления мобильными роботами, позволяющие решать поставленные перед роботом задачи. Следовательно, проектировщикам необходимо самостоятельно выбрать базу программных продуктов и разрабатывать собственную систему управления, которая свяжет элементы робота между собой и будет принимать решение о его действиях [7–8].

3. Современные платы, используемые в роботах, имеют ограниченный запас памяти для хранения процедур управления. Поэтому необходимо разработать новый метод программирования системы управления мобильным роботом, отличающийся минимальным набором команд, необходимых для успешного выполнения задач, поставленных перед роботом. При этом важно, чтобы результат работы алгоритма не только давал максимально точные результаты об окружающих робот объектах за приемлемое время, но и был простым.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлена экспериментальная модель мобильного робота, используемого для прохождения лабиринта.

Робот включает двухколесную платформу miniQ, два цифровых датчика линии, три инфракрасных дальномера Sharp 2D120X F 05, ультразвуковой дальномер HC-SR04, сервопривод FS90, аппаратно-программную платформу ArduinoUno, плату на базе мостовой H-схемы L298P Motor Shield и плату TroykaShield.

Схема подключения и соединения компонентов мобильного робота представлена на рис. 2.

Платы, представленные на рис. 2, *б*, *в*, *г*, устанавливаются последовательно одна на другую.

Алгоритм прохождения мобильного робота в лабиринте

Поиск мобильным роботом маршрута в лабиринте сведен к пяти шагам, которые выполняются в зависимости от того, какие препятствия находятся или отсутствуют вокруг него.

Шаг 1. Прямолинейное движение вперед.

Шаг 2. Контроль расстояния перед собой.

Шаг 3. В случае обнаружения препятствия определение нового направления движения.

Шаг 4. Поворот робота в лабиринте при обнаружении препятствия перед собой для его объезда.

Шаг 5. Выход из лабиринта.

Рис. 2. Функциональная схема мобильного робота:

а — схема подключения датчиков к платам; *б* — плата ArduinoUno; *в* — плата TroykaShield; *г* — плата MotorShield

Прямолинейное движение вперед является основным действием, которое выполняется в начале работы мобильным роботом. Двигаясь, робот постоянно отслеживает расстояние впереди себя по показаниям инфракрасного датчика. В случае обнаружения препятствия робот останавливается и ищет новое направление маршрута. Программа управления переходит к шагу 3, на котором с использованием ультразвукового дальномера, закрепленного на сервоприводе, определяется направление последующего движения. При вращении сервопривода ультразвуковой датчик определяет максимальное расстояние вокруг робота (рис. 3, расстояние L_1). После этого робот разворачивается на угол, соответствующий выбранному максимальному расстоянию. Для определения угла поворота используется нечеткая иерархическая система управления, которую рассмотрим ниже. Далее робот снова перемещается в прямолинейном направлении. При прохождении прямых длинных участков используется ускорение, т. е. программный таймер отслеживает, как долго робот движется прямолинейно и без остановок, и постепенно увеличивает

Рис. 3. Принцип прохождения роботом лабиринта

значение текущей скорости до тех пор, пока робот не обнаружит новое препятствие/стену или финишную черту. Факт пересечения финишной черты отслеживается датчиками линии, закрепленными под платформой miniQ робота. После этого система управления роботом прекращает его движение.

Пример работы алгоритма прохождения робота в лабиринте представлен на рис. 3.

Нечеткая иерархическая система управления мобильным роботом

Сложности с выбором системы управления связаны с тем, что плата Atmega32, используемая в аппаратной реализации робота, ограничена объемом памяти 32 кБ. Это обстоятельство вынуждает экономить на объемах программного кода для управления движением мобильного робота.

Иерархическая нечеткая система управления мобильным роботом, в которой значение выхода предыдущего уровня является входной величиной последующего, позволяет сократить объем программного кода за счет исключения ряда операций в структуре нечеткого вывода и является эффективным решением в подобной ситуации. Также включение алгоритмов нечетко-логического вывода в систему управления мобильным роботом позволяет использовать один и тот же вычислительный код на разных уровнях иерархии с разными параметрами и при этом экономить объем памяти, используемой в контроллере.

На основании модели движения мобильного робота, сформированной в виде пяти шагов, выделим переменные, с помощью которых система управления мобильным роботом позволяет определять маршрут его движения в лабиринте. Входными переменными являются масса мобильного робота m и напряжение питания u робота. На основании этих данных рассчитывается скорость v (м/с) движения робота. Так как в микроконтроллере используется восьмиразрядный АЦП, то аналоговый сигнал, передаваемый от ArduinoUno с помощью

платы Motor Shield на микродвигатели платформы miniQ для управления скоростью вращения колес робота, находится в диапазоне от 0 до 255. Данный сигнал получается с помощью широтно-импульсной модуляции, которая представляет собой отношение периода к длительности импульса в последовательности прямоугольных импульсов. Например, при 50 %-ной скважности половина периода сигнала имеет высокий уровень, другая половина — низкий. При этом уровень сигнала меняется от высокого (5 В), до низкого (0 В) около 500 раз в секунду. Это значит, что когда скважность равняется 50 %, на выходе сигнал составит 2,5 В. При 100 %-ной скважности на выходе будет 5 В, причем чем больше уровень этого сигнала, тем больше скорость вращения двигателя.

На следующем этапе движения происходит определение угла α , на который необходимо повернуться роботу в случае обнаружения препятствия перед ним. Для определения максимального расстояния вокруг используется ультразвуковой дальномер, закрепленный на сервоприводе. Путем вращения шпинделя сервопривода от 0 до 180° с шагом 10° дальномер проверяет расстояние до ближайшего препятствия в текущем направлении. В результате определяется 18 значений расстояний в сантиметрах, каждое из которых соответствует углу поворота шпинделя сервопривода.

В случае обнаружения максимального расстояния робот поворачивает на угол, соответствующий максимально найденной дистанции. Так, на рис. 3 это расстояние L_1 , следовательно, робот должен развернуться вправо на 90°. Для поворота требуется подача постоянного питания на двигатели с определенной временной задержкой t . При этом, чем больше скорость и напряжение, определенная на начальном этапе работы, тем меньшее время задержки требуется для поворота на один и тот же угол. Для расчета времени задержки на выходе нечеткой иерархической системы используем на входе ее второго уровня иерархии значения скорости и рассчитанного угла поворота.

На основании входных (масса, напряжение, скорость, угол) и выходной (время задержки) переменных организуем двухуровневую иерархическую нечетко-логическую систему управления мобильным роботом (рис. 4).

На первый уровень иерархии вынесен расчет скорости перемещения в зависимости от массы и напряжения на источнике питания [9], на второй

Рис. 4. Иерархическая нечетко-логическая система для управления мобильным роботом

уровень иерархии — определение времени задержки в миллисекундах от скорости и угла поворота [10—13].

Данные параметры задаются нечеткими функциями принадлежности, представленными на рис. 5.

Предложенная иерархическая система позволит мобильному роботу определять пути прохождения лабиринта.

Мягкий алгоритм управления мобильным роботом

Иерархическая нечеткая система управления мобильным роботом после разделения на уровни иерархии запишется в виде двух нечетких MISO-систем, что упрощает вычисление значения времени задержки, необходимой для поворота робота на требуемый угол. Основой иерархической нечеткой системы является мягкий алгоритм управления мобильным роботом [14—16]. Механизм работы мягкого алгоритма сформируем в виде последовательности из семи шагов.

Шаг 1. Фаззификация входных переменных. Первый уровень иерархии представлен нечеткой MISO-системой, у которой на входе — масса робота $M = [m_1] + [m_2] + [m_3]$ и напряжение $U = [u_1] + [u_2] + [u_3]$ на источнике питания, а на выходе — скорость движения $V = [v_1] + [v_2] + [v_3] + [v_4] + [v_5]$. Каждая из входных лингвистических переменных имеет три терма, а выходная — пять термов (рис. 5).

Шаг 2. Далее происходит определение степеней принадлежности для каждой из входных переменных на основе информации о массе и напряжении питания робота.

Шаг 3. Формирование базы знаний, в которой содержатся нечеткие правила вида "Если ... То" (табл. 1).

Шаг 4. Построение матрицы нечетких отношений. В качестве мягких арифметических операций

Рис. 5. Функции принадлежности переменных алгоритма нечетко-логического вывода иерархической системы: а — входная переменная "напряжение"; б — входная переменная "масса"; в — выходная переменная для первого уровня иерархии "скорость" и входная переменная для второго уровня иерархии "скорость"; г — входная переменная "угол"; д — выходная переменная на втором уровне иерархии "задержка времени"

использовалась формула нахождения мягкого минимума (soft-min)

$$\text{soft-min}(u, m) = \frac{u + m + \delta^2 - \sqrt{(u - m)^2 + \delta^2}}{2}, \quad (1)$$

где $\delta = 0,05$.

Формула взятия параметризованного мягкого максимума (soft-max) имеет вид

$$\text{soft-max}(u, m) = [\gamma \max(u, m) + 0,5(1 - \gamma)(u + m)], \quad (2)$$

где γ — оператор параметризации.

В результате при $\gamma = 1$ формула (2) сводится к операции жесткого максимума, при $\gamma = 0$ формула (2) сводится к операции среднего арифметического. Выражение (2) использует только два операнда, тогда для использования с большим числом операндов применяется оператор soft-MAX:

$$\text{soft-MAX} = \bigvee_{i=1}^n \text{soft-max}(u_i, m_i). \quad (3)$$

На основании формул (1)—(3) матрица нечетких отношений принимает вид, представленный в табл. 2.

Таблица 1

Нечеткая база знаний

НП		Если		То	НП		Если		То	НП		Если		То
НП ₁	u_1	m_1	v_5		НП ₄	u_2	m_1	v_4		НП ₇	u_3	m_1	v_3	
НП ₂	u_1	m_2	v_4		НП ₅	u_2	m_2	v_3		НП ₈	u_3	m_2	v_2	
НП ₃	u_1	m_3	v_3		НП ₆	u_2	m_3	v_2		НП ₉	u_3	m_3	v_1	

Матрица нечетких отношений

Выходной терм	Композиция			Максимум
v'_5	$b_1 = \text{soft-min}(u_1; m_1)$			b_1
v'_4	$b_2 = \text{soft-min}(u_1; m_2)$	$b_4 = \text{soft-min}(u_2; m_1)$		$\text{soft-max}(b_2, b_4)$
v'_3	$b_3 = \text{soft-min}(u_1; m_3)$	$b_5 = \text{soft-min}(u_2; m_2)$	$b_7 = \text{min}(u_3; m_1)$	$\text{soft-MAX}(b_3, b_5, b_7)$
v'_2	$b_6 = \text{soft-min}(u_2; m_3)$	$b_8 = \text{soft-min}(u_3; m_2)$		$\text{soft-max}(b_6, b_8)$
v'_1	$b_9 = \text{soft-min}(u_3; m_3)$			b_9

Следует заметить, что число заключений нечетко-логического вывода в матрице нечетких отношений будет равняться числу термов выходной переменной, т. е. пяти. В традиционной модели нечеткого вывода число заключений равняется числу правил. Тем самым, рациональное расположение элементов в матрице нечетких отношений позволяет уменьшить сложность вычислений.

Шаг 5. Усечение термов выходной переменной согласно формуле

$$\mu(v)_i' = \text{soft-min}(v_i; \mu(v_i)), \quad (4)$$

где $i = \overline{1, n}$ — номер заключения нечетко-логического вывода; n — число заключений нечетко-логического вывода.

Шаг 6. Объединение усеченных термов выходной переменной

$$\mu(v)' = \text{soft-MAX}[\mu(v)_1'; \mu(v)_2'; \mu(v)_3'; \mu(v)_4'; \mu(v)_5'],$$

$$i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Шаг 7. Дефаззификация осуществляется на основе метода центра тяжести

$$v' = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \mu(v)_i'}{\sum_{i=1}^n \mu(v)_i'}. \quad (6)$$

Таким образом, формулы (1)–(6) реализуют мягкий алгоритм нечетко-логического управления мобильным роботом.

Результаты моделирования

Важным этапом разработки системы управления мобильным роботом для прохождения лабиринта явилась экспериментальная настройка тестовых параметров соотношения времени задержки со скоростью движения и напряжения на источнике питания для последующего обучения нечетко-логической системы управления мобильного робота (более подробно рассмотрено во второй части статьи). Проблема заключалась в том, чтобы при определенных уровнях напряжения питания мобильного робота и различных значениях его скорости определить времена задержек, необходимые для

поворота мобильного робота влево или вправо на конкретный угол. Результаты эксперимента нахождения времен задержки при повороте робота на заданный угол сведены в табл. 3.

Опыты нахождения времени задержки выполнялись на проградуированной поверхности, представленной на рис. 6.

После изменения напряжения на 9 В, как и предполагалось, робот перестал поворачиваться на заданный угол, соответствующий напряжению в 6,5 В. Очередные экспериментальные тесты показали, что изменение напряжения на источнике меняет значение сигнала, подаваемое на двигатели мобильного робота. В результате была сформирована таблица задержек по времени для напряжения в 9 В (табл. 4).

Таблица 3

Время задержки
для напряжения 6,5 В
и скорости 120

Угол, °	Задержка, мс	
	при повороте вправо	при повороте влево
10	70	90
20	90	110
30	130	150
40	150	170
50	190	210
60	220	240
70	245	265
80	290	310

Таблица 4

Время задержки
для напряжения 9 В
и скорости 120

Угол, °	Задержка, мс	
	при повороте вправо	при повороте влево
10	60	75
20	80	95
30	110	125
40	140	155
50	165	180
60	205	220
70	230	245
80	260	275

Рис. 6. Поверочная проградуированная поверхность

Из табл. 3 видно, что задержка по времени различается для всех соответствующих углов при повороте вправо и влево. Подобная закономерность видна и в табл. 4. Это стало подтверждающим фактом того, что информация об управлении элементами мобильного робота носит неопределенный характер, поэтому использование нечеткой логики актуально при решении задачи управления мобильным роботом.

Вторым этапом экспериментального исследования было моделирование работы первого уровня иерархической нечеткой системы управления мобильного робота. Моделирование было проведено на основе предложенного мягкого алгоритма, причем в структуре нечеткого вывода мягкого алгоритма использовались как жесткие, так и мягкие арифметические операции. Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 7 (см. вторую сторону обложки).

Анализ графиков, представленных на рис. 7, показал, что при использовании в структуре нечеткого вывода жестких формул нахождения минимума и максимума при глобальной агрегации на основе композиционного правила имеются зоны нечувствительности, что говорит об отсутствии свойства аддитивности у нечеткой системы в случае использования жестких арифметических операций в структуре нечеткого вывода.

Заключение

При настройке автоматизированной системы угловой ориентации мобильного робота, перемещающегося внутри лабиринта с обхождением препятствий, следует отметить как основную проблему нехватки памяти аппаратной платформы для хранения сложных вычислительных алгоритмов. Решение данной проблемы представляется возможным за счет использования иерархической нечетко-логической системы вывода с использованием мягких арифметических операций в структуре нечеткого вывода, что позволяет системе реагировать на незначительные изменения входных значений любой из переменных [17–18]. Таким образом, нечеткая система будет аддитивна во всем диапазоне входных переменных.

Проведенные исследования доказали, что изменение напряжения влияет на скорость движения мобильного робота. Это влечет за собой изменение и времени задержки при поворотах. Поэтому следует отметить, что разработка иерархической системы угловой ориентации является актуальной. Дальнейшие исследования описаны во второй части статьи.

Список литературы

1. **Перельман Я. И.** Занимательная физика. Книга 1. М.: Ринн, 2015.
2. **Кравченко А. В.** Робот-лабиринт // Радиоаматор. Практическая радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 30–32.
3. **Takeshi Morishita, Osamu Tojo.** Integer inverse kinematics method using Fuzzy logic // Intelligent Service Robotics. 2013. Vol. 6, Iss. 2. P. 101–108.
4. **Nasiba A. Sabto, Khalib Al Mutib.** Autonomous mobile robot localization based on RSSI measurements using an RFID sensor and neural network BPANN / Journal of King Saud University // Computer and Information Sciences. 2013. N. 25. P. 137–143.
5. **Hongwei Mo, Qirong Tang, Longlong Meng.** Behavior-Bases Fuzzy Control for Mobile Robot Navigation // Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2013. Article ID 561451. 10 p.
6. **Бобырь М. В., Милостная Н. А.** Нечеткая модель интеллектуальной системы управления мобильным роботом // Проблемы машиностроения и автоматизации (Engineering and automation problems). 2015. № 3. С. 57–67.
7. **Титов В. С., Бобырь М. В., Кулабухов С. А.** Учет инерционности в нечетко-логических системах управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 12. С. 14–19.
8. **Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А., Глобин П. В.** Оценка достоверности при моделировании нечетко-логических систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 7. С. 32–38.
9. **Бобырь М. В.** Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 7. С. 449–455.
10. **Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А.** Особенности оценки точности измерений размеров при использовании высокоточных автоматизированных систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2005. № 6. С. 17–19.
11. **Бобырь М. В., Титов В. С., Кулабухов С. А.** Оценка влияния числа обучаемых точек на аддитивность нечетких систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 10. С. 30–35.
12. **Бобырь М. В., Кулабухов С. А.** Дефазификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 9. С. 32–41.
13. **Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А.** АСУ прогнозированием точности обработки деталей // Автоматизация в промышленности. 2008. № 4. С. 3–4.
14. **Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В.** Интеллектуальные системы на основе нечеткой логики и мягких арифметических операций: учеб. пособие. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2014. 341 с.
15. **Титов В. С., Бобырь М. В., Кулабухов С. А.** Нечетко-логическая система управления стабилизацией процесса резания деталей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 3. С. 54–58.
16. **Бобырь М. В., Титов В. С., Кулабухов С. А.** Оценка прогнозирования принятия решений в условиях неопределенности // Телекоммуникации. 2015. № 11. С. 39–44.
17. **Бобырь М. В., Титов В. С., Кулабухов С. А.** О некоторых свойствах мягкого алгоритма нечетко-логического вывода // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. "Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение". 2015. № 2 (59). С. 39–51.
18. **Бобырь М. В.** Диагностика оборудования с ЧПУ методами нечеткой логики // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 1. С. 18–20.

Hierarchical Fuzzy Control System for a Mobile Robot Angular Orientation. Part I

M. V. Bobyr, fregat_mn@rambler.ru✉, **S. A. Kulabuhov**, kulabuhov.sergei@yandex.ru,
A. S. Yakushev, alekseyakushev@yandex.ru,
South-Western State University, Kursk, 305040, Russian Federation

Corresponding author: **Bobyr Maksim V.**, D. Sc.,
Professor of the Computer Engineering South-Western State University,
Kursk, 305040, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Received on March 23, 2016

Accepted on March 30, 2016

The paper presents the existing algorithms and ways of passing labyrinths. Hardware and software were developed for an automated control system of a mobile robot angular orientation in labyrinths. The paper describes the elements included into the robot, as well as a scheme of their linking-up. One of the factors, which limit the use of the robotic systems in industry, is a small memory size of the microcontrollers. In order to compensate for this shortage, a fuzzy algorithm of passing based on analysis of the incoming information from the sensors was presented. In order to process the information coming from the sensors an articulated mobile robot control concept is used, based on a hierarchical fuzzy synthesized MISO-system. Its distinguishing feature is that the parameters of the previous level of the output are the input to the next level. A concept is presented for processing information coming from the sensors of the mobile robot control. It is based on a hierarchical fuzzy synthesized MISO-system. They make the system additive, and ensure its higher levels of accuracy and functionality. They make the system additive, and ensure higher levels for accurate events. Assessment of accuracy is carried out by the standard deviation (RMSE). The best system has a minimal value of RMSE. The experimental modeling presented in the paper confirms the adequacy of the developed fuzzy system.

Keywords: mobile robot, ArduinoUno, IDEArduino, mobile robot control program, ultrasonic range finder (HC-SR04), infrared range finder (Sharp 2D120X F 05), fuzzy logic, hierarchical fuzzy control system, soft computing

Acknowledgements: This work was supported by the RF President grant the MD-2983.2015.8.

For citation:

Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Yakushev A. S. Hierarchical Fuzzy Control System for a Mobile Robot Angular Orientation. Part I, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 458–464.

DOI: 10.17587/mau.17.458-464

References

1. **Perelman Y. I.** *Zanimatel'naya fizika. Kniga 1* (Interesting physics. Book 1), Moscow, Rimmis, 2015 (in Russian).
2. **Kravchenko A. V.** *Robot-labirint* (Robot maze), *Radioamator. Practical electronics*, 2010, no. 2, pp. 30–32 (in Russian).
3. **Takeshi Morishita, Osamu Tojo.** Integer inverse kinematics method using Fuzzy logic, *Intelligent Service Robotics*, 2013, vol. 6, iss. 2, pp. 101–108.
4. **Nasiba A. Sabto, Khalib Al Mutib.** Autonomous mobile robot localization based on RSSI measurements using an RFID sensor and neural network BPANN, *Journal of King Saud University. Computer and Information Sciences*, 2013, no. 25, pp. 137–143.
5. **Hongwei Mo, Qirong Tang, Longlong Meng.** Behavior-Bases Fuzzy Control for Mobile Robot Navigation, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, Article ID 561451, 10 p.
6. **Bobyr M. V., Milostnaya N. A.** *Nechetkaya model' intellektual'noi sistemy upravleniya mobil'nym robotom* (Fuzzy model of intellectual system of mobile robot), *Problems of Mechanical Engineering and Automation (Engineering Andautomation Problems)*, 2015, no. 3, pp. 57–67 (in Russian).
7. **Titov V. S., Bobyr M. V., Kulabuhov S. A.** *Uchet inertsiionnosti v nechetko-logicheskikh sistemakh upravleniya* (Accounting for persistence in fuzzy logic control systems), *Instruments and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics*, 2014, no. 12, pp. 14–19 (in Russian).
8. **Bobyr M. V., Titov V. S., Milostnaya N. A.** *Otsenka dosto-vernosti pri modelirovanii nechetko-logicheskikh sistem* (Globin PV Evaluation of the reliability of the simulation fuzzy logic systems), *Industrial ACS and controllers*, 2012, no. 7, pp. 32–38 (in Russian).
9. **Bobyr M. V.** *Adaptatsiya sistemy upravleniya mobil'nym robotom na osnove nechetkoi logiki* (Adaptation of mobile robot control system based on fuzzy logic), *Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 449–455 (in Russian).
10. **Titov V. S., Bobyr M. V., Milostnaya N. A.** Features evaluate the accuracy of measurements of the dimensions using high-precision automated systems, *Industrial ACS and Controllers*, 2005, no. 6, pp. 17–19 (in Russian).
11. **Bobyr M. V., Titov D. V., Kulabuhov S. A.** *Adaptatsiya sistemy upravleniya mobil'nym robotom na osnove nechetkoi logiki* (Assessing the impact of the number of trainees at the points additive fuzzy systems), *Industrial ACS and Controllers*, 2014, no. 10, pp. 30–35 (in Russian).
12. **Bobyr M. V., Kulabuhov S. A.** *Defazzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei* (Defuzzification output from the base of fuzzy rules on the basis of the difference between the areas), *Herald of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 9, pp. 32–41 (in Russian).
13. **Titov V. S., Bobyr M. V., Milostnaya N. A.** *ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei* (ACS prediction precision machining), *Automation in the Industry*, 2008, no. 4, pp. 3–4 (in Russian).
14. **Emelyanov S. G., Titov V. S., Bobyr M. V.** *ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei* (Intelligent systems based on fuzzy logic and soft arithmetic, Textbook), Moscow, ARGAMAK MEDIA, 2014, 341 p. (in Russian).
15. **Titov V. S., Bobyr M. V., Kulabuhov S. A.** *Nechetko-logicheskaya sistema upravleniya stabilizatsiei protsessa rezaniya detalei* (Fuzzy logic control system of the stabilization process of cutting parts), *Proc. of the South-Western State University*, 2013, no. 3, pp. 54–58 (in Russian).
16. **Bobyr M. V., Titov D. V., Kulabuhov S. A.** *Otsenka prognozirovaniya prinyatiya reshenii v usloviyakh neopredelennosti* (Evaluation of forecasting for decision making under uncertainty), *Telecommunications*, 2015, no. 11, pp. 39–44 (in Russian).
17. **Bobyr M. V., Titov D. V., Kulabuhov S. A.** *O nekotorykh svoistvakh myagkogo algoritma nechetko-logicheskogo vyvoda* (On some properties of soft algorithm fuzzy inference), *Proc. of the South-Western State University. A series of management, computer engineering, computer science. Medical device*, no. 2 (59), Kursk, 2015, pp. 39–51 (in Russian).
18. **Bobyr M. V.** *Diagnostika oborudovaniya s ChPU metodami nechetkoi logiki* (Diagnosis of CNC equipment methods of fuzzy logic), *Industrial ACS and Controllers*, 2010, no. 1, pp. 18–20 (in Russian).