

М. В. Бобырь, д-р техн. наук, доц., fregat_mn@rambler.ru,
Юго-Западный государственный университет

Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики*

Рассмотрен процесс адаптации системы управления мобильным роботом, использующейся для осуществления его перемещения вдоль линии. Адаптация реализуется сочетанием двух методов. Первый метод заключается в варьировании параметров треугольных функций принадлежности и структуры нечетких правил, используемых для описания входных и выходных переменных нечеткой системы управления роботом. Вторым методом является изменение структуры программного кода, который используется для управления мобильным роботом. Приведены результаты экспериментальных исследований, оценивающих время перемещения мобильного робота вдоль линии по овалному треку.

Ключевые слова: нечеткая система вывода, мобильный робот, система управления, RMSE, мягкие вычисления, мягкие арифметические операции

Введение

В настоящее время известно множество подходов, использующих для управления перемещением мобильных роботов нечетко-логические системы [1, 2]. Традиционными подходами к синтезу нечетких систем управления являются модели приближенных рассуждений Мамдани и Такаги — Сугэно [3, 4]. К основным задачам относятся не только построение нечетких систем, но и нахождение таких режимов, при которых должны наблюдаться наилучшие варианты решения поставленных задач управления. Одним из вариантов нахождения оптимальных режимов функционирования нечетких систем является использование в структуре нечеткого вывода мягких арифметических операций [5]. Другим эффективным подходом является нахождение оптимального числа нечетких правил, задающих взаимосвязь между входными и выходными параметрами [6]. В статье приведен анализ разработки и настройки нечеткой системы управления для перемещения мобильного робота вдоль линии.

Нечетко-логическая модель для системы управления роботом

Нечеткость в системе управления мобильным роботом возникает при разработке программного кода, использующегося для управления мобильным роботом. Рассмотрим переменные, которые необходимо учитывать в системе управления мобильным роботом при назначении режимов, связанных с его перемещением. Во-первых, затруднение возникает при назначении переменной *Speed*, определяющей скорость движения робота, численное значение которой посредством широтно-импульсной модуля-

ции передается на микромоторы мобильного робота. Диапазон значений переменной *Speed* $\in [0...255]$. Данный интервал ограничен имеющимся у микроконтроллера встроенным аналого-цифровым преобразователем размерностью 8 бит. Следует отметить, что чем больше значение этой переменной, тем быстрее робот будет перемещаться по заданной траектории. Однако при скорости больше 160 единиц на крутых поворотах возможны вылеты робота с трассы. Данная ситуация возникает из-за того, что цифровые датчики линии обладают малой чувствительностью. Вместе с тем, если $Speed < 60$, то микродвигатели робота вращаться не будут. Поэтому назначение параметра *Speed* носит неопределенный характер и в большинстве случаев он подбирается экспериментально.

Во-вторых, на значение параметра *Speed* оказывает влияние напряжение питания *u*, от которого питается мобильный робот. Например, робот может питаться от длинного провода, и тогда его масса *m* не изменяется. Однако если на мобильный робот подается питание от батареек 9V типа (6F22), то масса робота увеличивается. Робот может питаться и от батареек 1,5 V типа (AA-R6BE), при этом масса робота также увеличивается. Неоднозначность в данном случае возникает вследствие того, что чем больше напряжение питания, тем быстрее робот будет перемещаться по треку. Масса робота также оказывает влияние на скорость перемещения по треку: при уменьшении массы робота его скорость возрастает. С учетом вышеуказанного синтезируем нечеткую MISO-систему управления мобильным роботом. На ее входе имеются две входные переменные: *u* — напряжение питания и *m* — масса робота. На выходе управляющимся параметром является величина *Speed*, значение которой передается на микромоторы робота.

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

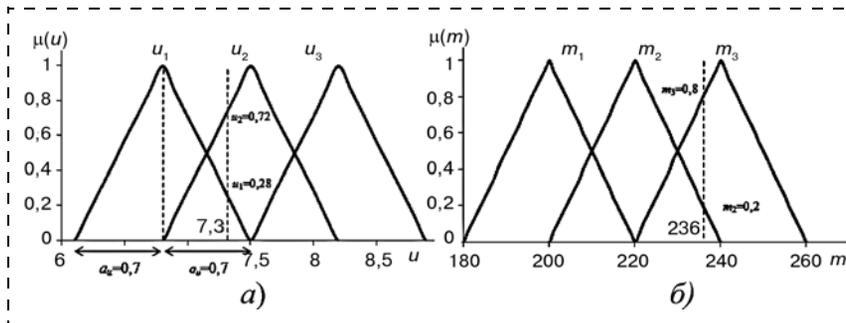


Рис. 1. Графики треугольных функций принадлежности: а — входная переменная — напряжение питания u ; б — входная переменная — масса робота m

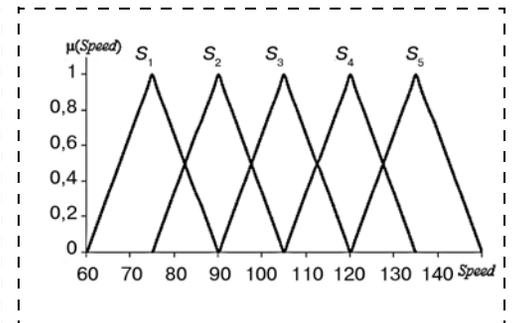


Рис. 2. График выходной функции принадлежности скорость вращения $Speed$

Алгоритм нечетко-логического вывода состоит из последовательной реализации семи шагов.

Шаг 1. Фазаификация входных переменных. Входными параметрами для управления мобильным роботом при перемещении его вдоль линии являются:

- напряжение питания — u (В);
- масса робота — m (г).

Вследствие того, что на микромоторы робота подается напряжение в диапазоне от 6 до 9 В, будем использовать этот диапазон значений для формирования треугольной функции принадлежности $U = [u_1] + [u_2] + [u_3]$ (рис. 1, а). Для построения треугольной функции принадлежности, описывающей массу мобильного робота, $M = [m_1] + [m_2] + [m_3]$ используем диапазон от минимального до максимального значения, т. е. от 180 г (без дополнительного груза) до 270 г (с батареями) (рис. 1, б).

В общем виде треугольная функция принадлежности записывается в виде

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (1)$$

где a, b, c — параметры функции принадлежности; x — количественное значение входного параметра по оси абсцисс.

Выходная переменная $Speed$, которая задает скорость вращения микромоторов, также имеет треугольную функцию принадлежности $Speed = [s_1] + [s_2] + [s_3] + [s_4] + [s_5]$ и задается в диапазоне [0...255] (рис. 2).

На рис. 1 и 2 видно, что параметры, используемые для изменения ширины оснований функций принадлежности, равны соответственно

- для входной переменной u — $a_u = 0,7$;
- для входной переменной m — $a_m = 20$;
- для выходной переменной S — $a_s = 15$.

Шаг 2. Определение степеней принадлежности. К примеру, на входе нечеткой системы имеется следующая информация: $u = 7,3$ (В) и $m = 236$ (г) (рис. 1, а, б):

$$\begin{aligned} u &= (u_1, u_2, u_3) = (0,28; 0,72; 0); \\ m &= (m_1, m_2, m_3) = (0; 0,2; 0,8). \end{aligned} \quad (2)$$

Шаг 3. Синтез базы знаний, содержащих нечеткие правила (НП) вида "Если...То" (табл. 1) [7–9].

Шаг 4. Построение матрицы нечетких отношений. При составлении матрицы нечетких отношений был учтен подход, предложенный в работах [10, 11]. Так как в структуре нечеткого вывода используются операции взятия нечеткого минимума и максимума, то в статье рассмотрим использование в системе управления роботом как жестких, так и мягких арифметических операций [12] (табл. 2).

С учетом этих формул матрица нечетких отношений представлена в табл. 3.

Шаг 5. Усечение термов выходной переменной

$$\mu(s)_i' = \text{soft} - \min_{i=1}^n (s'_i; \mu(s)), \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, n$ — номер заключения нечетко-логического вывода; n — число заключений нечетко-логического вывода; $\text{soft} - \min$ — операция мягкого минимума [5].

Шаг 6. Объединение усеченных термов выходной переменной

$$\begin{aligned} \mu(s)' &= \\ &= \text{soft} - \max_{i=1}^n [\mu'(s)_1; \mu'(s)_2; \mu'(s)_3; \mu'(s)_4; \mu'(s)_5], \end{aligned} \quad (4)$$

где $\text{soft} - \max$ — операция мягкого максимума [5].

Таблица 1

База знаний для системы управления мобильным роботом

НП	Если	То	НП	Если	То	НП	Если	То
НП ₁	u_1	m_1	НП ₄	u_2	m_1	НП ₇	u_3	m_1
НП ₂	u_1	m_2	НП ₅	u_2	m_2	НП ₈	u_3	m_2
НП ₃	u_1	m_3	НП ₆	u_2	m_3	НП ₉	u_3	m_3

Формулы арифметических операций

Жесткие операции	Мягкие операции
$\min(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 - (x_1 - x_2)\text{sgn}(x_1 - x_2)}{2},$ <p>где x_1 и x_2 — количественные характеристики, рассчитанные с учетом формулы 2; sgn — оператор разности определяется как</p> $\text{sgn}(x_1 - x_2) = \begin{cases} -1, & \text{если } x_1 - x_2 < 0; \\ 0, & \text{если } x_1 - x_2 = 0; \\ 1, & \text{если } x_1 - x_2 > 0. \end{cases}$	<p>Мягкий минимум:</p> $\text{soft-min}(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 + \delta^2 - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \delta^2}}{2},$ <p>где $\delta = 0,05$. Мягкий максимум: $\text{soft-max}(x_1, x_2) = \gamma \cdot \max(x_1, x_2) + 0,5(1 - \gamma)(x_1 + x_2) ,$ <p>где γ — оператор параметризации, при $\gamma = 1$ формула сводится к операции жесткого максимума, при $\gamma = 0$ формула сводится к операции среднего арифметического (MEAN)</p> </p>

Матрица нечетких отношений

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

Шаг 7. Дефаззификация на основе метода центра тяжести [13–16]

$$S_y = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \mu(s)_i'}{\sum_{i=1}^n \mu(s)_i'} \quad (5)$$

Формулы (1)–(5) формируют нечеткий алгоритм для системы управления мобильным роботом.

Структурная модель мобильного робота и принцип его работы

Экспериментальная модель мобильного робота, реализованная для его перемещения вдоль линии, представлена на рис. 3, а.

В данной экспериментальной модели робота используются следующие компоненты: двухколес-

ная платформа miniQ, включающая монтажную платформу DFRobot, пару колес 42 × 19 мм и два микромотора шириной 12 мм с редуктором; два цифровых датчика линии; аппаратно-программную платформу ArduinoUno; плату расширения для Arduino на базе чипа L298P Motor Shield (два канала, 2 А); пассивную плату расширения TroykaShield, позволяющую присоединять датчики к микроконтроллеру.

Цифровые датчики линии используются для интеллектуализации процесса управления роботом. Так, датчики выдают логический ноль, когда под роботом черная поверхность, и логическую единицу в противоположном случае. Чтобы робот перемещался прямо по треку (рис. 3, б), два сенсора должны показывать логические единицы или нули. При повороте направо правый сенсор при заезде на трек показывает логический ноль. При повороте налево левый сенсор при заезде на трек показывает логи-

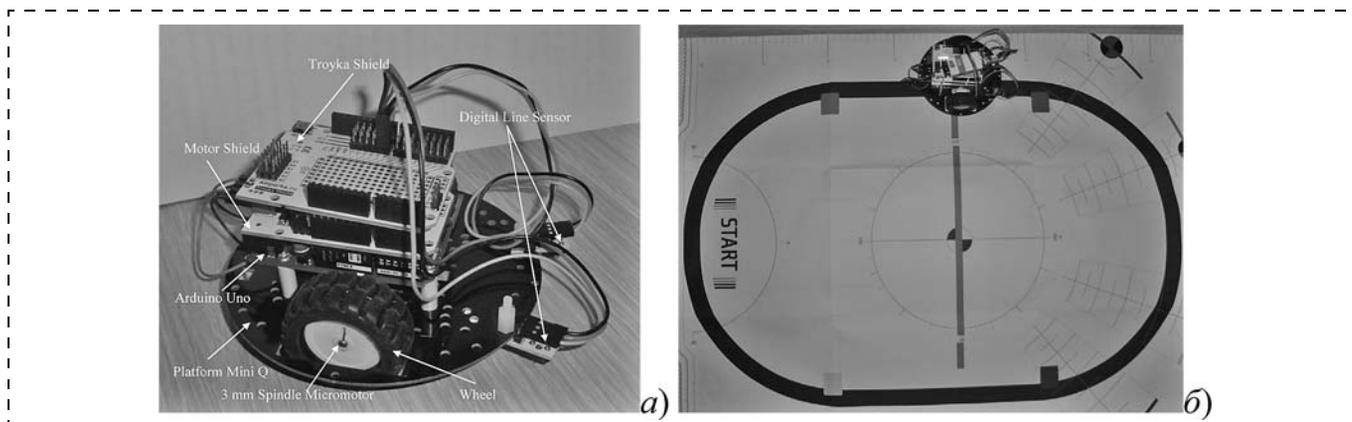


Рис. 3. Мобильный робот: а — экспериментальная схема; б — трек для перемещения робота

Таблица 4

**Состояние цифровых датчиков
и команды для управления роботом**

Левый датчик линии	Правый датчик линии	Команда
0	0	Вперед
0	1	Поворот налево
1	0	Поворот направо
1	1	Вперед

ческий ноль. В табл. 4 представлены возможные состояния датчиков и команды, которые необходимо отдать микроконтроллеру для того, чтобы он сформировал управляющее воздействие о перемещении робота.

Моделирование работы нечетко-логического вывода для управления мобильным роботом и экспериментальное исследование

На основе работы алгоритма нечетко-логического вывода, рассмотренного выше, были получены результаты, которые сведены в табл. 5 и 6.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Анализ результатов, представленных в табл. 5 и 6, а также на рис. 4, показывает, что для жесткой модели нечетко-логического вывода в табл. 6 (область,

выделенная серым цветом) характерна область нечувствительности робота. Если масса и напряжение питания робота будут иметь значения, диапазон которых выделен серым цветом в табл. 6, то робот не будет перемещаться вдоль трека. При использовании мягкого нечетко-логического вывода нечувствительность исключена.

Для оценки задачи обучения нечеткой базы знаний, синтезированной в первой части статьи, по выборке, представленной в табл. 1, осуществляется поиск вектора таких значений ψ , при которых среднеквадратическое отклонение будет минимально:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{i=1}^w (S_d - S_{ЭТ})^2} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где w — число измерений в выборке; S_d — значения параметра *Speed*, полученные при реализации мягкого или жесткого нечетко-логического вывода; $S_{ЭТ}$ — эталонная выборка параметра *Speed* (табл. 7).

С учетом формулы (6) были проведены расчеты среднеквадратического отклонения (*RMSE*) для данных, полученных при моделировании жесткой (см. табл. 6) и мягкой моделей (см. табл. 5) нечеткого вывода, и данных, соответствующих эталонной выборке (табл. 7). Для повышения достоверности результатов на основе данных эталонной выборки было сформировано уравнение регрессии: $S_{рег} = 123,75 - 0,085a_1 + 0,084a_2$. Расчет показателя *RMSE* приведен в табл. 8.

Таблица 5

Расчет параметра *Speed* на основе мягкой модели нечеткого вывода

<i>u</i>	<i>m</i>									
	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
6,1	105	135	135	127,5	105	82,5	75	75	105	105
6,4	105	135	134,94	127,7	120	112,71	104,92	105	105	105
6,7	135	134,99	134,96	127,64	120,01	112,68	104,98	105,03	135	135
7	129,38	131,7	132,35	124,85	117,47	109,64	102,33	101,57	129,38	129,38
7,3	120	127,15	126,77	119,77	111,75	104,32	96,43	96,81	120	120
7,6	90	116,6	117,34	109,63	102,31	94,21	87,24	86,49	90	90
7,9	86,54	111,97	111,61	104,33	96,44	88,89	81,5	81,84	86,54	86,54
8,2	75	104,95	105	97,49	90	82,36	75,03	75,04	75	75
8,5	75	104,99	105,03	97,5	90	82,35	75,02	75,01	75	75
8,8	105	105	105,14	97,54	90	82,28	75,04	75	105	105

Таблица 6

Расчет параметра *Speed* на основе жесткой модели нечеткого вывода

<i>u</i>	<i>m</i>									
	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
6,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,4	0	135	135	127,5	120	112,5	105	105	0	0
6,7	0	135	135	127,5	120	112,5	105	105	0	0
7	0	131,57	132,27	124,53	117,27	109,53	102,27	101,57	0	0
7,3	0	127,02	126,64	119,34	111,64	104,34	96,64	97,02	0	0
7,6	0	116,57	117,27	109,53	102,27	94,53	87,27	86,57	0	0
7,9	0	112,02	111,64	104,34	96,64	89,34	81,64	82,02	0	0
8,2	0	105	105	97,5	90	82,5	75	75	0	0
8,5	0	105	105	97,5	90	82,5	75	75	0	0
8,8	0	105	105	97,5	90	82,5	75	75	0	0

Эталонная выборка параметра *Speed*

<i>u</i>	<i>m</i>									
	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
6,1	93	113	113	102	99	108	88	129	92	116
6,4	126	123	88	100	103	130	98	126	95	124
6,7	126	86	122	90	109	110	86	83	105	84
7	83	119	90	91	101	103	116	82	96	113
7,3	110	118	119	98	83	119	87	107	107	83
7,6	125	118	103	86	109	105	107	117	119	81
7,9	125	124	99	94	88	91	82	80	104	84
8,2	108	114	106	127	83	106	89	125	84	122
8,5	115	87	103	108	107	83	115	97	125	116
8,8	101	115	82	110	129	122	92	123	96	91

Анализ табл. 8 показывает, что при моделировании жесткой модели нечеткого вывода коэффициент имеет наибольшее значение $RMSE_{soft_fis}$ и в 2,7 раза хуже, чем при использовании мягкой модели нечеткого вывода.

Данные экспериментальных исследований перемещения мобильного робота вдоль трека длиной 2 м (см. рис. 3, б) приведены в табл. 9.

Анализ данных табл. 9 показал, что при использовании нечеткого вывода с жесткими арифметическими операциями в двух экстремальных случаях робот не реагирует на параметр *Speed* и не решает поставленную перед ним задачу. Для мягкой системы нечеткого вывода все серии опытов были удачными.

Однако для нечеткого вывода с мягкими арифметическими операциями при маленьком напряжении наблюдается слишком большое время, требуемое роботу для выполнения поставленной задачи. Для повышения времени прохождения роботом трека необходимо выполнить структурно-параметрическую адаптацию системы управления.

Структурно-параметрическая адаптация системы управления робота

Как было отмечено выше, минимизация времени, требуемого для выполнения роботом поставленной задачи, возможна за счет реструктуризации нечетких правил (см. табл. 1) и изменения параметров функции принадлежности (1).

Шаг А. Модифицируем структуру нечетких правил, использующихся для управления мобильного робота. Необходимо, чтобы при минимальных значениях напряжения и массы робота на выходе переменная *Speed* имела большее значение, чем 105 (табл. 9). Это возможно осуществить, если у НП 6, 8 и 9 изменить терм, на который они будут ссылаться (табл. 10). В табл. 10 модифицированные правила выделены серым цветом.

После этого проведем моделирование работы алгоритма нечетко-логического вывода с использованием как мягких, так и жестких арифметических операций. Результат работы нечеткого вывода показан на рис. 5 (см. третью сторону обложки). Значения коэффициента $RMSE$ для оценки точности нечеткого вывода приведены в табл. 11.

Таблица 8

Расчет показателя $RMSE$

$RMSE_{reg}$	$RMSE_{soft_fis}$	$RMSE_{hard_fis}$
14,56	67,12	24,52

Таблица 9

Перемещение мобильного робота по треку

№ опыта	Жесткий нечеткий вывод				Мягкий нечеткий вывод			
	<i>u</i> , В	<i>m</i> , г	<i>Speed</i>	<i>t</i> , с	<i>u</i> , В	<i>m</i> , г	<i>Speed</i>	<i>t</i> , с
1	6,1	180	—	—	6,1	180	105	27,61 26,15 27,27
2	7,5	220	105	10,29 10,85 10,66	7,5	220	105	9,93 10,45 10,42
3	9	260	—	—	9	260	105	11,08 10,35 10,32

Таблица 10

Модифицированные нечеткие правила

НП	Если			То			НП	Если			То		
НП ₁	<i>u</i> ₁	<i>m</i> ₁	<i>s</i> ₅	НП ₄	<i>u</i> ₂	<i>m</i> ₁	<i>s</i> ₄	НП ₇	<i>u</i> ₃	<i>m</i> ₁	<i>s</i> ₃		
НП ₂	<i>u</i> ₁	<i>m</i> ₂	<i>s</i> ₄	НП ₅	<i>u</i> ₂	<i>m</i> ₂	<i>s</i> ₃	НП ₈	<i>u</i> ₃	<i>m</i> ₂	<i>s</i> ₄		
НП ₃	<i>u</i> ₁	<i>m</i> ₃	<i>s</i> ₃	НП ₆	<i>u</i> ₂	<i>m</i> ₃	<i>s</i> ₄	НП ₉	<i>u</i> ₃	<i>m</i> ₃	<i>s</i> ₅		

Таблица 11

Расчет показателя $RMSE$ после модификации структуры нечетких правил

$RMSE_{reg}$	$RMSE_{soft_fis}$	$RMSE_{hard_fis}$
14,56	67,4	21,19

Анализ рис. 5 и табл. 11 показывает, что значение *Speed* увеличилось практически для всех диапазонов значений переменной *m* и *u*. Однако показатель $RMSE$ уменьшился только для нечеткой системы, использующей мягкие арифметические операции. Для жесткой нечеткой системы наблюдается увеличение $RMSE$.

Шаг Б. Изменим параметр a (см. рис. 1, a) функций принадлежности для входных и выходных переменных нечеткой системы управления. Результат моделирования приведен в табл. 12.

Графики, интерпретирующие полученные в табл. 12 результаты, представлены на рис. 6 (см. третью сторону обложки).

Основной вывод из полученных результатов следующий: при структурно-параметрической адаптации жесткие решения дают результат, сопоставимый с мягкими операциями. Данный вывод основан на численном моделировании нечеткой системы и расчете показателя $RMSE$. С учетом структурно-параметрической адаптации было проведено новое экспериментальное исследование перемещения мобильного робота по треку, результаты которого представлены в табл. 13.

Как видно из приведенных в табл. 13 данных, время, необходимое для перемещения мобильного робота по треку, во всех случаях снизилось. При

этом нечеткая система, использующая жесткие арифметические операции, не имеет зон нечувствительности, что значительно увеличивает ее запас устойчивости [17–22].

Шаг В. Программная адаптация. В случаях, когда робот движется по прямой трека, он может делать ускорение. Для этого к текущей скорости робота прибавляется переменная $Speed_Step$. Результаты перемещения робота после программной адаптации приведены в табл. 14.

Анализ табл. 13 и 14 показал, что при программной адаптации наблюдается увеличение скорости робота и, как следствие, уменьшение времени, необходимого для перемещения робота по треку.

Заключение

Экспериментальные исследования, приведенные в статье, показали, что мягкие арифметические операции без настройки алгоритма нечеткого вывода позволяют с более высоким качеством управлять мобильным роботом. Так, экспериментально установлено, что без использования методов адаптации при жестких вычислениях $RMSE = 67,12$, а при мягких вычислениях $RMSE = 24,52$, т. е. точность мягкой нечеткой системы в 2,7 раза лучше по сравнению с жесткой системой управления. Однако при использовании методов структурно-параметрической и программной адаптации точность жесткой системы управления повышается и уже сопоставима с мягкой системой управления. Так, после структурно-параметрической адаптации для мягкой и жесткой нечеткой системы управления $RMSE = 20,5$. Следует заметить, что сложность вычислений при использовании жесткого нечеткого вывода снижается, что увеличивает оперативность процесса принятия управляющих решений. Примеры структурно-параметрической адаптации с поясняющими иллюстрациями детально рассмотрены в статье.

Список литературы

1. Шербатов И. А., Проталинский И. О., Бородин В. А. Система интерпретирования голосовых команд для управления мобильным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 14–18.
2. Majid Moradi Zirkohi, Mohammad Mehdi Fateh, Mahdi Aliyari Shoorehdeli. Type-2 Fuzzy Control for a Flexible — joint Robot Using Voltage Control Strategy // International Journal of Automation and Computing. 2013. Vol. 10, Iss. 3. P. 242–255.
3. Нусратов О. К., Джафаров П. С., Зейналов Э. Р., Мустафаева А. М., Джафаров С. М. Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой TS-моделью для управления манипулятором робота с гибким соединением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 8. С. 10–14.
4. Пергат А. Нечеткое моделирование и управление: Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 798 с.
5. Бобырь М. В., Титов В. С., Акульшин Г. Ю. Моделирование нечетко-логических систем управления на основе мягких арифметических операций // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 29–35.
6. Бобырь М. В., Титов В. С., Акульшин Г. Ю. Влияние числа правил на обучение нечетко-логической системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 11 (125). С. 28–35.
7. Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах

Таблица 12

Расчет показателя $RMSE$ при изменении параметра ФП

Параметры ФП	$RMSE_{soft_fis}$	$RMSE_{hard_fis}$
$a_u = 0,8; a_m = 25; a_s = 20$	22,21	38,68
$a_u = 0,9; a_m = 30; a_s = 25$	21,34	38,26
$a_u = 1; a_m = 35; a_s = 25$	20,48	20,44

Таблица 13

Перемещение мобильного робота по треку после структурно-параметрической адаптации

№ опыта	Жесткий нечеткий вывод				Мягкий нечеткий вывод			
	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$
1	6,1	180	130	7,41 7,80 7,60	6,1	180	130	7,41 7,80 7,60
2	7,5	220	112	5,87 5,80 5,79	7,5	220	112	5,87 5,80 5,79
3	9	260	130	3,61 4,33 4,29	9	260	130	3,61 4,33 4,29

Таблица 14

Перемещение мобильного робота по треку после программной адаптации

№ опыта	Жесткий нечеткий вывод				Мягкий нечеткий вывод			
	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$	$u, В$	$m, г$	$Speed$	$t, с$
1	6,1	180	130	7,65 7,33 7,38	6,1	180	130	7,65 7,33 7,38
2	7,5	220	112	5,31 5,43 5,42	7,5	220	112	5,31 5,43 5,42
3	9	260	130	3,12 4,07 3,35	9	260	130	3,12 4,07 3,35

управления оборудованием с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 5. С. 18—23.

8. Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В. Адаптивные нечетко-логические системы управления. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2013. 184 с.

9. Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 21—26.

10. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Алгоритм самообучения адаптивных нейро-нечетких систем на основе мягких вычислений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 8. С. 003—009.

11. Титов В. С., Бобырь М. В., Беломестная А. Л. Интеллектуальная система управления подачей при обработке деталей резанием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 8. С. 17—20.

12. 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.

13. Бобырь М. В., Титов В. С., Беломестная А. Л. Стабилизация теплового режима в процессе резания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 6. С. 38—41.

14. Бобырь М. В., Титов В. С. Метод коррекции параметров режима резания в системах с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7. С. 49—53.

15. 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.

16. Бобырь М. В. Модернизация АСУ оборудованием с ЧПУ на основе аппарата нечеткой логики // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 40—43.

17. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А., Бобовников Н. Ю. Устройство для обработки деталей на оборудовании с ЧПУ. Патент РФ на изобретение № 2309034.

18. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Устройство высокоточной обработки деталей на оборудовании ЧПУ. Патент РФ на изобретение № 2280540.

19. Титов В. С., Бобырь М. В., Яхонтова Е. С. Способ и устройство управления точностью обработки деталей. Патент РФ на изобретение № 2379169.

20. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Устройство управления точностью обработки деталей. Патент РФ на изобретение № 2288809.

21. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Анализ систем управления машиностроительным оборудованием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2009. № 2. С. 3—4.

22. Бобырь М. В., Емельянов С. Г., Милостная Н. А. О некоторых свойствах моделирования адаптивных нейронечетких систем на основе упрощенного нечетко-логического вывода // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 5. С. 4—12.

Adaptation of the Mobile Robot Control System Based on Fuzzy Logic

M. V. Bobyr, fregat_mn@rambler.ru, South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation

Corresponding author: Bobyr Maxim V., D. Sc., Professor, South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, email_b@mail333.com

Received on March 23, 2015

Accepted April 16, 2015

The article is devoted to the process of adaptation of the control system of a mobile robot for its movement along a line. To this end, the article proposes a fuzzy logic and structural model for robot control, combining two methods of adaptation. The first method consists in variation of the parameters of the triangular membership functions and structure of the fuzzy rules, which are used to describe the input and output variables of a fuzzy robot control system. In order to improve the reliability of the solutions proposed in the structure of the fuzzy inference, hard and soft arithmetic operations are used. Evaluation of the system is based on calculation of a standard deviation (RMSE — root mean square error). The best solution for the fuzzy system is the option, in which the RMSE is minimal. The second method envisages a change in the structure of the control code of a mobile robot. The results of the experimental studies presented in the article show that without the use of the methods of the structural and parametric adaptation the accuracy of the soft fuzzy model is 2,7 times higher than the accuracy of a rigid fuzzy model, which has a dead zone, reducing its stability. However, a combination of the above methods makes the accuracy of the rigid model higher than that of the soft model. At that, a deadband is ruled out and computational complexity is reduced. In order to explain the proposed methods of adaptation the article presents the results of the experimental studies evaluating the movement of a mobile robot along a line on an oval track.

Keywords: fuzzy inference system, mobile robot, control system, RMSE, soft computing, soft arithmetic operations

Acknowledgements: This work was supported with MD-2983.2015 grant of the President of the Russian Federation.

For citation:

Bobyr M. V. Adaptation of the Mobile Robot Control System Based on Fuzzy Logic, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 449—455.

DOI: 10.17587/mau.16.449-455

References

1. Shcherbatov I. A., Protalinskii I. O., Borodin V. A. *Sistema interpretirovaniya golosovykh komand dlya upravleniya mobil'nyim robotom* (The System of Interpreting of Voice Commands for Control a Mobile Robot), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 14—18 (in Russian).

2. Majid Moradi Zirkohi, Mohammad Mehdi Fateh, Mahdi Aliyari Shoorehdeli. Type-2 Fuzzy Control for a Flexible — joint Robot Using

Voltage Control Strategy, *International Journal of Automation and Computing*, 2013, vol. 10, iss. 3, pp. 242—255.

3. Nusratov O. K., Dzhafarov P. S., Zeinalov E. P., Mustafayeva A. M., Dzhaforov S. M. *Analiiticheskiy metod sinteza regulyatora s nechetkoi TS-model'yu dlya upravleniya manipulyatorom robota s gibkim soedineniem* (Analytical Method for Design of a Controller with Fuzzy Model for Control of a Flexible Joint Robot Arm as a Nonlinear Dynamical Object), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 8, pp. 10—14 (in Russian).

4. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy Modeling and Control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012, 798 p. (in Russian).

5. Bobyr' M. V., Titov V. S., Akul'shin G. Yu. *Modelirovanie nechetko-logicheskikh sistem upravleniya na osnove myagkikh arifmeticheskikh operatsii* (Modeling of Fuzzy-logic Control Systems on the Basis of Soft Arithmetic Operations), *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 29—35 (in Russian).

6. **Bobyř M. V., Titov V. S., Akul'shin G. Yu.** *Vliyanie chisla pravil na obuchenie nechetko-logicheskoi sistemy* (Effect of number rule on training of fuzzy-logic systems), *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii*, 2014, № 11 (125), pp. 28–35 (in Russian).
7. **Titov V. S., Bobyř M. V., Antsiferov A. V.** *Adaptivnyi mul'ti-setevoi algoritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU* (Adaptive Multineuro Algorithm Fuzzy-Logic Inference in the Tasks Control of the Equipment with CNC), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 5, pp. 18–23 (in Russian).
8. **Emel'yanov S. G., Titov V. S., Bobyř M. V.** *Adaptivnye nechetko-logicheskie sistemy upravleniya* (Adaptive Fuzzy Logic Control System), Moscow, ARGAMAK-MEDIA, 2013, 184 p. (in Russian).
9. **Titov V. S., Bobyř M. V., Antsiferov A. V.** *Algoritm vysokoskorostnoi obrabotki detalei na osnove nechetkoi logiki* (Automated System of the High-Speed Detail Processing), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 6, pp. 21–26 (in Russian).
10. **Emel'yanov S. G., Bobyř M. V., Antsiferov A. V.** *Algoritm samoobucheniya adaptivnykh neuro-nechetkikh sistem na osnove myagkikh vychislenii* (Self-developed algorithm adaptive neuro-fuzzy systems based on soft computing), *Informatsionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, vol. 11, no. 8, pp. 003–009 (in Russian).
11. **Titov V. S., Bobyř M. V., Belomestnaya A. L.** *Intel'ktual'naya sistema upravleniya podachei pri obrabotke detalei rezaniem* (Intellectual Control System of Feed at Cutting), *Promyshlennyye ASU i Kontrollery*, 2010, no. 8, pp. 17–20 (in Russian).
12. **Emel'yanov S. G., Titov V. S., Bobyř M. V.** *Intel'ktual'nye sistemy na osnove nechetkoi logiki i myagkikh arifmeticheskikh operatsii* (Intelligent systems based on fuzzy logic and soft arithmetic operations), Moscow, ARGAMAK-MEDIA, 2014, 341 p. (in Russian).
13. **Bobyř M. V., Titov V. S., Belomestnaya A. L.** *Stabilizatsiya teplovogo rezhima v protsesse rezaniya* (Stabilisation of Thermal Modes in the Course of Cutting), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 6, pp. 38–41 (in Russian).
14. **Bobyř M. V., Titov V. S.** *Metod korrektsii parametrov rezhima rezaniya v sistemakh s ChPU* (Automated Control Systems Accuracy of Processing of Details with Usage of Methods of Fuzzy Logic), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 7, pp. 49–53 (in Russian).
15. **Bobyř M. V., Titov V. S., Milostnaya N. A., Globin P. V.** *Otsenka dostovernosti pri modelirovani nechetko-logicheskikh sistem* (The reliability of when modeling a fuzzy-logic systems), *Promyshlennyye ASU i Kontrollery*, 2012, no. 7, pp. 32–38 (in Russian).
16. **Bobyř M. V.** *Modernizatsiya ASU oborudovaniem s ChPU na osnove apparata nechetkoi logiki* (Modernisation Of The Automated Control Systems By The Equipment With NPC On The Basis Fuzzy Logic), *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii*, 2010, no. 2, pp. 40–43 (in Russian).
17. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A., Bobovnikov N. Yu.** *Ustroistvo dlya obrabotki detalei na oborudovanii s ChPU. Patent RF na izobretenie № 2309034* (Apparatus For Working Parts In Number Program Controlled Equipment) (in Russian).
18. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A.** *Ustroistvo vysokotochnoi obrabotki detalei na oborudovanii ChPU. Patent RF na izobretenie № 2280540* (Part High-Accuracy Working Apparatus In NC Machine Tools) (in Russian).
19. **Titov V. S., Bobyř M. V., Yakhontova E. S.** *Sposob i ustroistvo upravleniya tochnost'yu obrabotki detalei. Patent RF na izobretenie № 2379169* (Method And Device For Accuracy Control Of Details Treatment) (in Russian).
20. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A.** *Ustroistvo upravleniya tochnost'yu obrabotki detalei. Patent RF na izobretenie № 2288809* (Part Working Accuracy Control Apparatus) (in Russian).
21. **Titov V. S., Bobyř M. V., Milostnaya N. A.** *Analiz sistem upravleniya mashinostroitel'nykh oborudovaniem* (Analysis of control systems engineering equipment), *Promyshlennyye ASU i Kontrollery*, 2009, no. 2, pp. 3–4 (in Russian).
22. **Bobyř M. V., Emel'yanov S. G., Milostnaya N. A.** *O nekotorykh svoystvakh modelirovaniya adaptivnykh neuro-nechetkikh sistem na osnove uproschennogo nechetko-logicheskogo vyvoda* (Some properties of the simulation of adaptive neuro-fuzzy systems based on a simplified fuzzy inference), *Informatsionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy*, 2014, vol. 12, no. 5, pp. 4–12 (in Russian).

УДК 531.38; 681.5

DOI: 10.17587/mau.16.456-463

Е. И. Нелаева, аспирант, LomovtsevaEI@yandex.ru,
Ю. Н. Челноков, д-р физ.-мат. наук, проф., chelnokovyun@info.sgu.ru,
 Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского,
 Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Решение прямых и обратных задач кинематики роботов-манипуляторов с использованием дуальных матриц и бикватернионов на примере стэнфордского манипулятора¹. Часть 2²

На примере стэнфордского манипулятора рассматривается методология решения обратной задачи кинематики с использованием бикватернионной теории кинематического управления. Разрабатывается алгоритм решения обратной задачи кинематики. Приводятся примеры численного решения обратной задачи кинематики для стэнфордского манипулятора, выявляющие зависимости численного решения от параметров задачи.

Ключевые слова: робот-манипулятор, бикватернион, кинематические уравнения, обратная задача кинематики

1. Постановка задачи

Рассматривается решение обратной задачи кинематики с использованием бикватернионной теории кинематического управления [1]. В качестве

модели движения стэнфордского манипулятора [2] используются кинематические уравнения движения манипулятора [3]

$$(\dot{\varphi}_1 \ \dot{\varphi}_2 \ \dot{d}_3 \ \dot{\varphi}_4 \ \dot{\varphi}_5 \ \dot{\varphi}_6)^T = A^{-1} \cdot (\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ v_1 \ v_2 \ v_3)^T, (1)$$

где φ_i ($i = 1, 2, 4, 5, 6$), d_3 — обобщенные координаты манипулятора; матрица A является сложной функцией обобщенных координат; ω_i и v_i — проекции угловой и линейной скоростей выходного

¹ Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", № 6, 2015.

² Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00165).