

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Ту Раин

Аспирант, Курский государственный университет
therein.48@gmail.com

FUZZY-BASED CONTROL OF ROBOT MANIPULATOR

R. Thu

Summary. This paper addresses the development and application of fuzzy-based control technique to plan trajectories of a robotic manipulator collision-free in static environments. The proposed technique can be seen as a composition of separate fuzzy units, which steer the manipulator links individually. Each fuzzy-unit comprises a fuzzy-controller whose rule base is set up to exert impelling forces which depend on the local environment of the link. The fuzzy-based technique has been successfully applied to constructed manipulator operating in real as well as simulated environments. The technique has been proved to work without complications in static environments.

Keywords: fuzzy logic, obstacle avoidance, fuzzy controller, intelligent control system, manipulator.

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются разработка и применение нечеткой логики при планировании траекторий робота-манипулятора с возможностью обхода препятствий в статичных рабочих средах. Представленную систему можно рассматривать как комплекс отдельных устройств нечеткой логики, каждое из которых управляет движением отдельного звена манипулятора. Элементом каждого устройства является нечеткий регулятор, действующий на базе нечетких правил, которая формируется таким образом, чтобы обеспечить управляющие воздействия, адекватные локальной рабочей среде каждого звена манипулятора. Система управления с нечеткой логикой была успешно испытана на манипуляторах как в реальных условиях, так и в симитированной рабочей среде. Данная система продемонстрировала оптимальное выполнение своих функций в статичной рабочей среде.

Ключевые слова: нечеткая логика, обход препятствий, нечёткий регулятор, система интеллектуального управления, робот-манипулятор.

Решение проблемы обхода препятствий неизбежно становится важной задачей робототехники в случае невозможности вычислить траекторию робота до начала его движения, или непредвиденных изменений в рабочей среде, либо в отсутствие информации о точном расположении препятствий. В сложившейся практике техника обхода препятствий реализуется в многоуровневых системах планируемого поведения. Каждый уровень представляет собой функциональный модуль, выполняющий какую-либо определенную задачу. Модули обычно реализуют такие функции, как планирование задач, глобальное планирование траекторий, обход препятствий, управление двигателями. Возможным решением проблемы обхода препятствий является сквозная иерархическая структура, где модули более высокого уровня осуществляют управление модулями более низкого уровня [1].

Нечеткая логика — это широко распространенный метод, который уже служит для решения целого ряда задач, связанных с задачами управления. Нечеткая логика успешно применяется в управлении двигателями, в решении проблемы торможения грузовых фур [2], навигации судов, поведенчески-ориентированной навигации мобильных роботов, в управлении захватом и перемещением различных объектов манипуляторами с захватным устройством [4], в противобуксовочных системах автомобилей [3, с. 147], в системах связи, в управлении биотехнологическими процессами, а так-

же и в решении пресловутой проблемы перевернутого маятника.

Принципиальная схема нечеткого управления довольно сходна с обычной системой управления (Рис. 1). На этом рисунке представлен нечеткий регулятор с обратной связью, регулирующее движения физического устройства, например, робота. Рассматриваемая в данной работе управляющая система разработана на базе контроллера Сугено. Благодаря его вычислительной эффективности, метод Сугено обычно предпочитают методу Мамдани для управления в реальном времени [5].

Фазификатор переводит пространство входов, которое обычно описывает фактическое состояние устройства относительно его целевого состояния, в нечеткий формат. В случае навигации робота для описания состояния устройства (робота) используются два входных сигнала датчиков. Первый сигнал дает информацию о расхождении между фактической и целевой конфигурацией звена, а второй — о дистанции между звеньями и препятствиями. Фазификатор разбивает пространство входного сигнала на ряд нечетких множеств. Входная переменная, описывающая угол между фактической и целевой конфигурацией звена ($\Delta\theta_j$) разбивается на значения, выражаемые терминами: «далеко слева (FL)», «близко слева (CL)», «контакт (CT)», «близко справа (CR)», «далеко справа (FR)» (Рис. 4). Переменная, описывающая дистанцию между звеном и препятствием (d_j) разбивает-

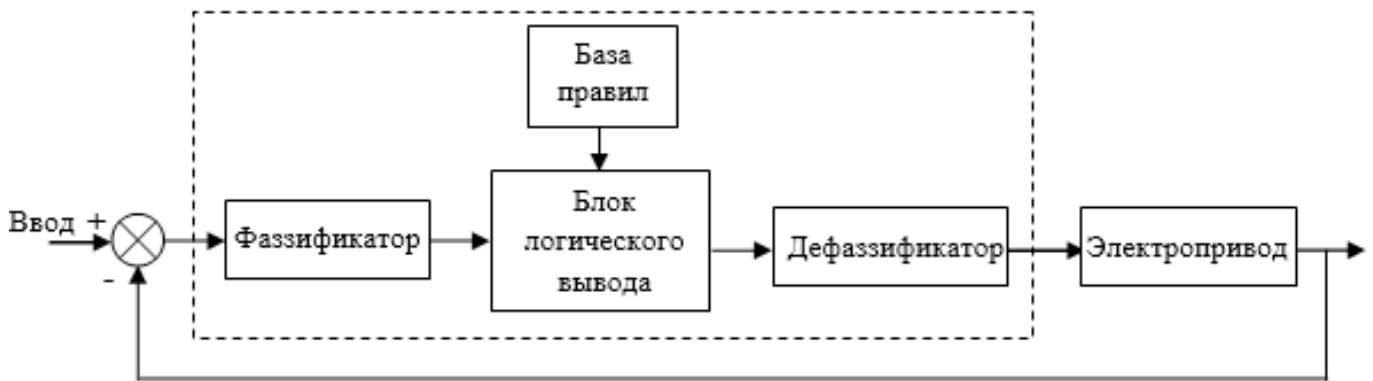


Рис. 1. Система нечеткого управления.

ся на: «далеко слева (FL)», «слева (L)», «близко слева (CL)», «близко справа (CR)», «справа (R)», «далеко справа (FR)» (Рис. 5). Каждое из этих нечетких множеств чувствительно к определенному ряду значений входной переменной, а степень принадлежности показывает, насколько данное значение переменной принадлежит какому-либо нечеткому множеству.

На втором этапе выходные переменные фаззификатора преобразуются в нечеткий логический вывод. В базе правил нечеткого логического вывода выходные переменные фаззификатора ассоциируются с парными нечеткими множествами входа. Здесь база правил представлена в виде двумерной таблицы соответствия (Таб.1); элементами данной таблицы являются различные скалярные величины, описывающие действия, выраженные терминами «очень резко влево (LVB)», «резко влево (LB)», «немного влево (LS)», «очень мало влево (LVS)», «ничего», «очень немного вправо (RVS)», «немного вправо (RS)», «резко вправо (RB)», «очень резко вправо (RVB)» и т.д. Опять-таки, обращаясь к примеру навигации робота, одно из правил может выглядеть так: ЕСЛИ цель (целевой ориентир) «далеко справа» (FR) И препятствие «близко слева» (CL) ТО двигаться «резко вправо» (RB). Таким образом, механизм нечеткого логического вывода генерирует определенное действие, которое будет выполняться роботом в ответ на определенные входные сигналы.

На финальном этапе, множественные выходы блока нечеткого логического вывода (что может быть представлено в виде нескольких «активных» ячеек таблицы нечетких правил) необходимо обобщить и преобразовать так, чтобы получить четкий выходной сигнал. В модели Сугено конечный выходной сигнал представляет собой сумму выхода нечеткого логического вывода, взвешенную по сумме выходов фаззификатора. Конечный выходной сигнал обычно активирует один из приводов, что заставляет управляемый объект изменить свою фактическую конфигурацию.

Данная разработка состоит из отдельных устройств обхода препятствий с нечеткой логикой, каждое из которых контролирует одно определенное звено: $l_j, j = 1, \dots, n$. Для вычисления расстояний и изменений углов между объектами можно использовать стационарную камеру, камеру ПЗС, которая обеспечивает контроль всего рабочего пространства; в ходе испытаний такая камера действовала как «look-ahead camera» (камера упреждающего просмотра рабочего пространства), позволяя выявить изменения в обстановке. Задача управляющего устройства с нечеткой логикой — смоделировать функцию управления, которая позволяла бы конвертировать входные переменные в адекватный командный сигнал для двигателя привода. В общих чертах, эту функцию можно описать следующим образом: с одной стороны, она должна обеспечить приведение соответствующего звена в крайнее положение, которое оно может принять под воздействием «притягивающего» импульса; с другой стороны она должна обеспечить торможение звена при сближении с препятствием, что сообщается «отталкивающим» импульсом. База правил нечеткой логики (на основании которой действует фаззи-устройство) строится исходя из правил, диктуемых обычным здравым смыслом, которые затем корректируются опытным путем. В случае решения проблемы обхода препятствий, база правил должна позволить оценить конфликтующие входные сигналы, которые часто носят противоречивый характер, в их взаимосвязи и сделать соответствующий вывод относительно дальнейших действий (управляющий сигнал). В данной разработке при каждой итерации цикла сигналы о дистанциях до ближайшего препятствия слева (d_{left}) и справа (d_{right}) от звена манипулятора (l_j) последовательно поступают на входы устройства (Рис. 2). Этот процесс может также происходить параллельно, если два аналогичных контроллера с нечеткой логикой параллельно вычисляют необходимую реакцию в отношении левого и правого препятствия по отдельности. Итоговая команда двигателю привода вырабатывается методом совмещения двух полученных команд, таким образом, учитывается влияние обоих препятствий.

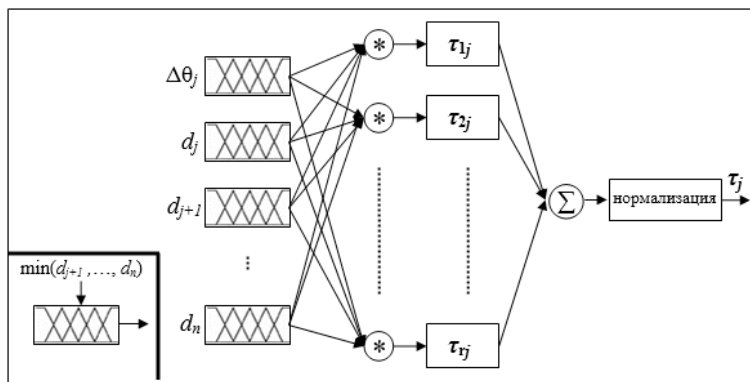


Рис. 2. Подробное описание блока нечеткого управления звена манипулятора $l_j, j=1, \dots, n$.

Первая переменная входа каждого устройства с нечеткой логикой представляет собой угол между фактической и целевой конфигурацией звена, $\theta_j - \theta_{j, target} = \Delta\theta_j, j = 1, \dots, n$, (где n — число звеньев манипулятора). Значение $\Delta\theta_j$ является положительной величиной, если целевой ориентир находится справа и отрицательной, если он расположен слева. Второй вход — числовое значение, описывающее дистанцию между звеном l_j и ближайшими препятствиями слева и справа в сканируемой области, $d_j \in D_j$. Дистанция до препятствия слева выражается отрицательной величиной, а до препятствия, расположенного справа — положительной величиной. С единственного выхода устройства подается управляющий сигнал — команда двигателю привода $\tau_j, \tau_j \in T_j$. В положительном численном выражении сигнал заставляет привод перемещать звено влево, а в отрицательном — вправо.

Существуют разнообразные варианты функций принадлежности, в которых можно представить нечеткие множества. В данной работе мы предпочли использовать треугольную функцию принадлежности, поскольку она позволяет легко и быстро производить вычисления, и из-за ее простых формул. Значения переменных m_{lp} и m_{rp} являются координатами оси X слева и справа от нуля (точки пересечения осей) соответственно, а m_{cp} описывает координату оси X, где степень ее принадлежности нечеткому множеству достигает единицы (1); представление этих трех параметров дает функция принадлежности, имеющая треугольную форму[6]:

$$\mu_p(d_j) = \begin{cases} \min((d_j - m_{lp}) / (m_{cp} - m_{lp}), 0) & \text{if } d_j \leq m_{cp} \\ \min((d_j - m_{rp}) / (m_{cp} - m_{rp}), 0) & \text{if } d_j > m_{cp} \end{cases} \quad (1)$$

А также треугольные функции продолжают как постоянные значения величины (1) в левой и правой частях интервала:

$$\mu_p(d_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } d_j \leq m_c \\ \min((d_j - m_r) / (m_c - m_r), 0) & \text{if } d_j > m_c \end{cases} \quad (2)$$

Вышеупомянутую треугольную функцию принадлежности, выстроенной по трем параметрам {a, b, c}, где $a < b < c$, можно доступно описать следующим образом[6]:

$$\mu(x) = 0 \rightarrow x \leq a$$

$$\mu(x) = \frac{x-a}{b-a} \rightarrow a \leq x \leq b$$

$$\mu(x) = \frac{c-x}{c-b} \rightarrow b \leq x \leq c, \text{ and } \mu(x) = 0 \rightarrow c \leq x$$

В дополнение к двум входам d_j and $\Delta\theta_j$, где $j = 1, 2, 3$, каждое устройство (за исключением наиболее дистально расположенного) использует нечеткие множества значений переменной «дистанция», которые поступают с входным сигналом от более дистально расположенных звеньев $\mu(d_j + 1)$. Это позволяет принять правильное решение и обеспечить торможение проксимальных звеньев, если дистально расположенному звену угрожает столкновение с препятствием. То есть каждое устройство оперирует следующими нечеткими множествами: $\mu^k(d), k = j, j+1, \dots, n$ и $\mu^k(\Delta\theta_j)$. Каждое из значений переменных этих нечетких множеств описывается лингвистическими терминами A_j^k и B_j^k соответственно. То есть для звена лингвистическое выражение нечетких правил управления $R_j^r, r=1, 2, \dots, r_j$, из которых состоит база правил, можно представить следующим образом:

R_j^r : IF d_j is A_j^r AND...AND d_n is A_n^n AND $\Delta\theta_j$ is B_j^r THEN τ_j

(R_j^r : ЕСЛИ d_j is A_j^r И...И d_n is A_n^n И $\Delta\theta_j$ is B_j^r ТОГДА τ_j),

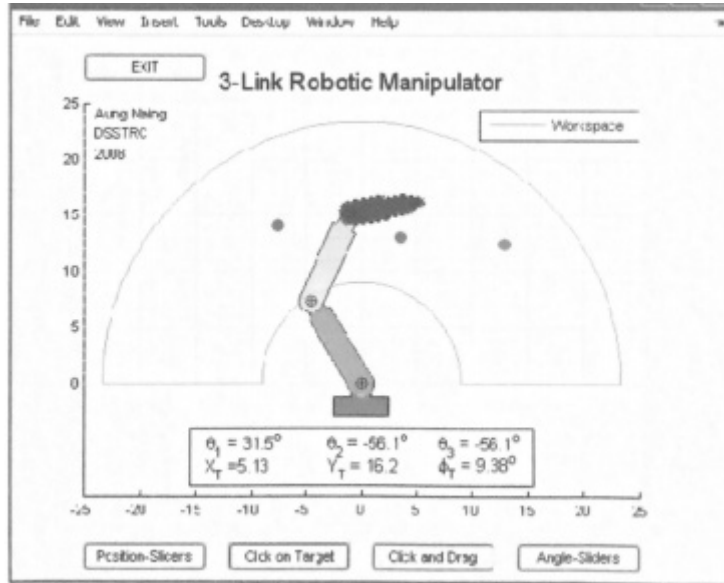


Рис. 3. Модель трехзвенного манипулятора с использованием MATLAB

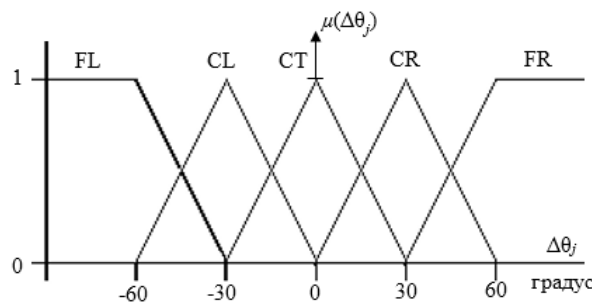


Рис. 4. Определение данных для угла между фактической и целевой конфигурацией звена

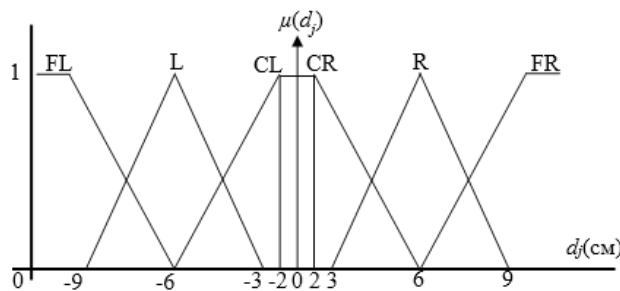


Рис. 5. Определение данных для дистанции между звеном и препятствием

где $r_j=1, 2, \dots, r_j$ — число нечетких правил для устройства, контролирующего звено L_{jr} , а τ_{ri} — четкая величина, в которой выражается нечеткая запись правила, и которая используется в процессе дефаззификации. Для записи правил нечеткой логики в данной работе используется логический оператор пересечения нечетких множеств (AND), а в качестве операторов нечеткого вывода — оператор «минимум» (MIN) и «алгебраическое произведение». Если используется оператор «минимум»,

он выбирает минимальное значение степеней истинности переменных входа. Если используется оператор произведения, значения переменных входов перемножаются друг с другом. Пересечение нечетких множеств вычисляется с помощью оператора произведения[7]:

$$\sigma_{rj} = \mu_j(d_j) \cap \dots \cap \mu_n(d_n) \cap \mu_j(\Delta\theta_j), \quad (3)$$

используя оператор произведения,

Таблица 1. База правил

$\Delta\theta_j$	d_j	FL	L	CL	CR	R	FR
FL		0,1	-0,3	-0,5	0,5	0,3	0,3
CL		0,1	-0,01	-0,3	0,3	0,3	0,1
CT		0	0	-0,1	0,1	0,1	0
CR		-0,1	-0,3	-0,3	0,3	0,01	-0,1
FR		-0,3	-0,3	-0,5	0,5	0,3	-0,1

$$\sigma_{rj} = \mu_j(d_j) * \dots * \mu_n(d_n) * \mu_j(\Delta\theta_j). \quad (4)$$

Во всех правилах выходная переменная контроллера данного устройства с нечеткой логикой дана как средне-взвешенная величина.

$$\tau_j = \frac{\sum_{rj=1}^{rj} \sigma_{rj} \tau_{rj}}{\sum_{rj=1}^{rj} \sigma_{rj}} \quad (5)$$

Определение данных входа и выхода для нечетких регуляторов

В данной работе применяется алгоритм на базе правил нечеткой логики для управления манипулятором из трех звеньев. Общая длина рабочего органа составляет 36 единиц (см), первое звено имеет длину 13 единиц (см), среднее — 13 единиц (см) и концевое — 10 единиц (см). В имитационной модели манипулятора было допущено, что толщина звеньев равна нулю. Моделирование было выполнено на платформе MATLAB с применением инструментария нечеткой логики.

Определение данных (как входа, так и выхода) зависит от знаний системного разработчика и опыта имитации управления манипулятором. Например, какому значению соответствует «далеко слева», сколько именно составляет угол между фактической и целевой конфигурацией звена, а также все действия выхода — все это определяет системный разработчик.

Пример расчетов

Для наиболее дистально расположенного звена (звено 3), входные данные (с входного изображения ПЗС-камеры и сканирующего устройства с обработкой цветного изображения средствами MATLAB) определены как: 1) угол между фактической и целевой конфигурацией звена -40 градусов; 2) дистанция между препятствием и звеном 2,5 см. Эти значения переменных входа активируют соответствующие нечеткие множества, которые затем объединяются с помощью логического оператора

произведения. Следующий шаг — активация двух действий из двумерной базы правил. Эти два действия объединяются (вычисляется их взвешенная сумма) и таким образом преобразуются в единый четкий выход. Этот четкий выходной сигнал является командой приводу, которая находится в диапазоне между «очень резко влево» (0,5) и «резко влево» (0,3).

Угол расхождения между фактической и целевой конфигурацией звена активирует два нечетких множества «близко слева» (CL) и «далеко слева» (FL), со значениями переменных 0,3 и 0,7; дистанция до препятствия имеет значение 0,9. Активируются также два правила из таблицы нечетких правил выхода:

Правило 1: ЕСЛИ расхождение (с целью) «далеко слева» И дистанция (препятствие) «близко справа» ТОГДА перемещение очень резко влево (0,5)

Правило 2: ЕСЛИ расхождение (с целью) «близко слева» И дистанция (препятствие) «близко справа» ТОГДА перемещение резко влево (0,3).

Пересечение нечетких множеств вычисляется с помощью уравнения 5 (см. выше). Используя оператор произведения и значения из Правил 1 и 2, получаем $0.9 * 0.7 = 0.63$ and $0.9 * 0.3 = 0.27$. Совмещением этих двух правил мы получаем один выходной сигнал:

$$\tau = \frac{(0.63 * 0.5) + (0.27 * 0.3)}{0.63 + 0.27} = 0.44$$

Этот выходной сигнал является командой приводу, которая находится в диапазоне между «очень резко вправо» (0,5) и «резко вправо» (0,3).

Функциональные качества устройств с нечеткой логикой можно оценить, проанализировав функции преобразования. Функция преобразования нечеткого регулятора в устройстве управления звеном 1 представлена на рисунке 6, где показана переменная выхода контроллера как функция от изменяющихся значений сигналов на двух входах.

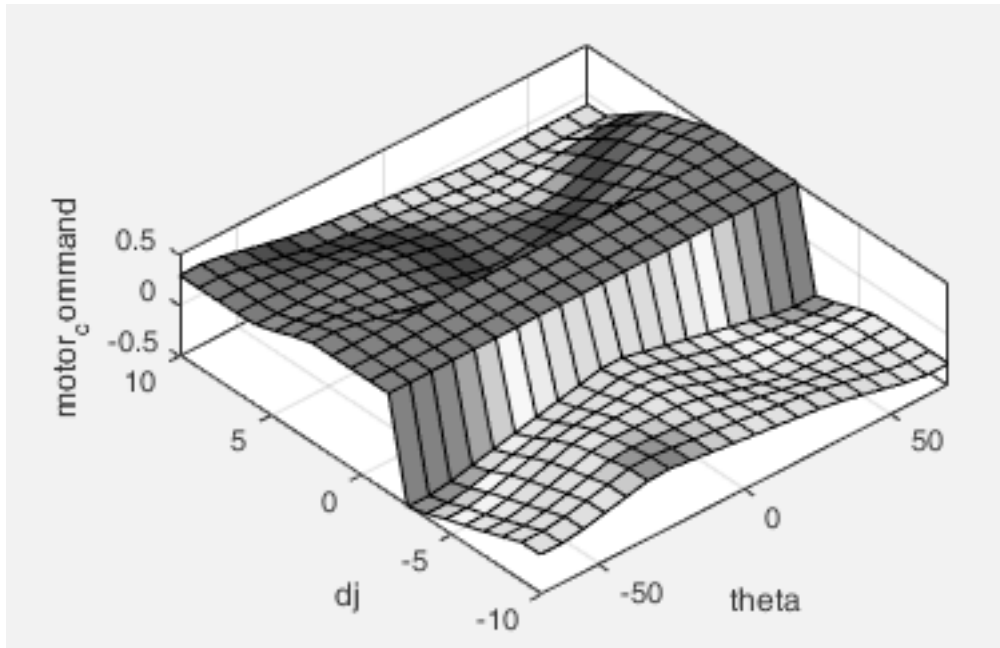


Рис. 6. Функция преобразования нечеткого регулятора в устройстве управления звеном 1

График функции в форме крыла представляет выходной сигнал нечеткого регулятора для разных дистанций от звена до препятствий, расположенных справа от этого звена. Функция преобразования данных выхода для препятствий слева от звена (не представлена на данном рисунке) зеркально-симметрична изображенной функции по оси. Обратите внимание, что в ходе большинства проведенных нами испытаний происходит суперпозиция выходной переменной одного контроллера и выходной переменной другого, который «следит» за препятствиями, ближайшими к противоположному концу звена.

На графике функции преобразования (Рис. 6) значения дистанций до препятствия варьируют в диапазоне пространства входа. Серые участки представляют области активации определенных правил. Лингвистические термы рядом с участками взяты из правой части Таблицы 1. Хорошо различимы три области графика:

- ♦ (правый отрезок функции преобразования) Наглядно видно, что, если целевой ориентир «слева» или «далеко слева», выходная переменная контроллера на протяжении всего интервала имеет положительное значение, то есть преобразовывается в команду приводу «перемещение влево», если целевой ориентир «слева» или «далеко слева». Такая реакция контроллера не зависит от дистанции от звена до препятствия справа, что логично, поскольку на движение звена влево не влияет препятствие, расположенное справа.

- ♦ (средний отрезок функции преобразования) Когда конфигурация звена близка к целевой, значение выходной переменной стремится к нулю. Препятствие, расположенное «близко справа», порождает незначительный «отталкивающий» импульс.
- ♦ (левый отрезок функции преобразования) Когда целевой ориентир находится справа от звена, становится очевидным, что обход препятствий является доминантой в логике поведения нечеткого регулятора. При наличии препятствия «близко справа» или «справа», контроллер в любом случае рекомендует движение звена влево, даже если целевой ориентир находится справа. Только в том случае, если препятствие располагается «далеко справа», контроллер позволит звену переместиться «немного вправо». Таким образом обеспечивается надежный обход препятствий, и если целевой ориентир конфигурации расположен с той же стороны звена, что и препятствие, целевая конфигурация будет принята, только если препятствие находится достаточно далеко.

Заключение

Итак, практически установлено, что механизм управления с нечеткой логикой успешно осуществляет навигацию робота-манипулятора и обеспечивает обход препятствий в статичных рабочих средах. Представленную систему можно рассматривать как комплекс отдельных устройств нечеткой логики, каждое из которых управля-

ет движением отдельного звена манипулятора. Элементом каждого устройства является нечеткий регулятор, действующий на базе нечетких правил, которая формируется таким образом, чтобы обеспечить управляющие воздействия, адекватные локальной рабочей среде каждого звена манипулятора. Установлено, что устройства нечеткой логики должны принимать решения не с уче-

том наличия какого-либо одного препятствия, а с учетом двух ближайших препятствий слева и справа от звена. Система управления с нечеткой логикой была успешно испытана на манипуляторах как в реальных условиях, так и в симулированной рабочей среде. Данная система продемонстрировала оптимальное выполнение своих функций в статичной рабочей среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Z. Althoefer, «Control of a Redundant Manipulator Using Fuzzy Rules» 1992.
2. Z. Katsuhiko Ogata, «Modern Control Engineering» Fourth Edition 2002.
3. S. Rahman, «Neural-Fuzzy Consumer Appliance Applications», Proceedings of Fuzzy Logic, с. 234–7.
4. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов. — 2-е изд., исправ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
5. Е. И. Юревич и др., Интеллектуальные роботы: пособие для вузов — М.: Машиностроение, 2007. — 360 с.
6. C. Altrock and B. Krause, «Fuzzy Logic and Neurofuzzy Technologies in Embedded Automotive Applications», Proceedings of Fuzzy Logic, с.113–9.
7. C. Neffenger, «Fuzzy Logic in Motor Control», Fuzzy Logic Proceedings, с. 111–10.

© Ту Раин (therein.48@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Курский государственный университет