

УДК 004.896

С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокин

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## СТРАТЕГИИ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕСНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

*Статья посвящена разработке системы навигации автономных мобильных роботов с нечеткими стратегиями управления. Предложенный метод позволяет реализовать различные типы поведения колесного робота в условиях наличия и отсутствия проприоцептивной информации. Для координации типов поведения применяются простые супервизорные блоки. Реализуемые роботом действия основаны на измерениях датчиков для определения положения цели и измерения расстояния до препятствий. Вычислительная трудоемкость предлагаемого метода позволяет его реализовать в реальном масштабе времени.*

**Ключевые слова:** *мобильный робот, нечеткая система, навигация, стратегии управления, нечеткий регулятор.*

### Введение

Исследования в области робототехники основаны в основном на концепции создания систем искусственного интеллекта (ИИ), оснащенных техническими средствами для эффективного управления перемещением (навигации) МР (при этом отдается приоритет безопасности и надежности такого перемещения по сравнению с его оптимальностью) [1].

Системы навигации МР могут располагать моделью окружающей среды, в которой представлены фиксированные основные элементы: препятствия, стены, двери, мебель и т.п. Реализация таких традиционных систем навигации в реальном времени часто сопряжена с определенными трудностями, так как требует наибольших вычислительных ресурсов и большого объема памяти, связанных с необходимостью осуществления подробной картографии среды и соблюдения при этом требований к скорости и точности перемещения. Для сложной окружающей среды (частично неизвестной или динамически изменяющейся) зачастую не хватает технических возможностей для автоматического наблюдения, анализа ситуации и принятия решений МР без столкновений с непредвиденными препятствиями. Траекторию движения МР такого типа рассчитывает на основе анализа доступной информации, после чего реализует соответствующие выработанные действия. С другой стороны, можно реализовать стратегии оперативного управления МР с непосредственным использованием информации от датчиков робота, чтобы достичь цели, избегая препятствий в случае динамического изменения среды, основываясь на методах ИИ [2, 3].

К наиболее распространенным подходам к такому решению задач навигации МР следует отнести применение нечеткой логики, искусственных нейронных сетей (ИНС), машинного обучения и гибридных методов. При нечетком подходе поведение

МР описывается лингвистическими правилами типа «Если-То». Эти правила получают обычно с применением оценок экспертов. Следует отметить, что для сложной и динамичной среды возникают сложности при построении представительной базы таких правил, так как число рассматриваемых возможных ситуаций резко увеличивается [4].

С другой стороны, проблема обучения и адаптации в задачах навигации МР в последние годы становится все более важной. Для решения этой проблемы наиболее часто используются методы самонастройки и ИНС. Основной идеей при этом является обучение МР на наборе ситуаций, после чего обученная ИНС позволяет принимать адекватные решения в случае возникновения новых ситуаций. Супервизорная настройка требует наличия достаточного количества пар «ситуация-действие». Несмотря на быструю сходимость соответствующих алгоритмов, зачастую трудно получить необходимое число данных для настройки. Возможным решением такой проблемы может оказаться применение методов машинного обучения с подкреплением (RL) [5]. Основная идея RL-методов состоит в улучшении поведения МР на каждом шаге путем максимизации некоторой функции выигрыша с использованием значений сигнала подкрепления от окружающей среды. При этом робот вначале исследует среду для связи ситуаций и соответствующих действий (с получением положительного или отрицательного результата), а затем проводит прогнозирование среднего возможного максимального выигрыша.

Нечеткое управление показало свою эффективность для задач навигации МР, но синтез нечетких регуляторов (НР), позволяющих получить желаемое поведение МР, не всегда является тривиальным. Основным недостатком концепции применения нечеткой логики является отсутствие обобщенной методологии при наличии значительного числа определяемых параметров (параметров функций принад-

лежности, правил нечеткого вывода и т.п.). В ряде исследований приводятся методы синтеза НР в интеграции с другими подходами ИИ, например, с ИНС, генетическими алгоритмами (ГА), RL-методов и т.п. Эти гибридные методы часто позволяют получить более эффективное решение по сравнению с использованием только НР.

**Целью статьи** является разработка метода автономной навигации МР в неизвестной среде с обходом препятствий с применением нечеткой модели Такаги-Сугено, который позволяет реализовать различные типы поведения робота в условиях наличия и отсутствия проприоцептивной информации.

### Модель мобильного робота

Рассмотрим базовую модель МР типа «трицикл», имеющего 3 колеса (2 задних и одно переднее), один двигатель, обеспечивающий управляемое перемещение, и один одометрический датчик для измерения положения и продольной скорости. Ориентация переднего колеса (угол его поворота) регулируется вторым двигателем. Это колесо, обеспечивающее устойчивость МР, оснащено датчиком ориентации, позволяющим измерять угол поворота шасси робота.

Предполагается, что в реальных случаях МР может быть оснащен набором датчиков для измерения переменных с учетом специфики выполняемой задачи. Будем использовать две системы координат: систему ХОУ в трехмерном пространстве и систему хоу мобильного робота. Основным назначением МР является достижение желаемой цели в пределах пространства навигации, избегая столкновения с препятствиями, которые робот автономно объезжает. Система автономной навигации должна генерировать такие управляющие действия, как изменение угла поворота переднего колеса  $\alpha$  и линейной скорости робота  $V_r$ .

На рис. 1 представлена конфигурация используемого типа МР и переменные, определяемые в пределах такой конфигурации.

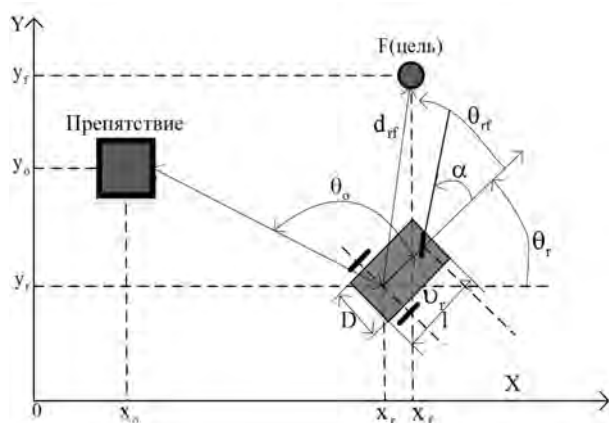


Рис. 1. Конфигурация используемого типа МР

Кинематическая модель рассматриваемого МР может быть представлена в дискретном времени следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} x_r(k+1) &= x_r(k) + T_0 V_r(k) \cos(\theta_r(k)), \\ y_r(k+1) &= y_r(k) + T_0 V_r(k) \sin(\theta_r(k)), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\theta_r(k+1) = \theta_r(k) + T_0 \frac{V_r(k)}{l} \operatorname{tg}(\alpha(k)),$$

где  $\theta_r$  – ориентация МР относительно горизонтальной оси;  $d_{rf}$  – расстояние между МР и целью;  $\theta_{rf}$  – угол между текущей ориентацией МР и текущей ориентацией цели;  $l$  – длина шасси;  $D$  – ширина МР;  $D_{го}$  – расстояние от МР до цели;  $\theta_0$  – угол между ориентацией МР и препятствием;  $\alpha$  и  $V_r$  – управляющие воздействия МР (угол поворота переднего колеса и линейная скорость перемещения соответственно);  $T_0$  – период квантования сигналов во времени.

### Нечеткое управление мобильным роботом для различных типов поведения

Рассмотрим метод решения задачи автономного перемещения в неизвестной среде (с обходом препятствий) колесного МР, основанный на концепции нечетких поведений по правилам Такаги-Сугено (ТС) нулевого порядка, для различных структур управления. Этот метод позволяет синтезировать простые и эффективные регуляторы в реальном времени. Глобальная система управления МР основана на кинематической модели (1), где нечеткие регуляторы (НР) позволяют вырабатывать два управления движением (угол поворота переднего колеса  $\alpha$  и скорость перемещения МР  $V_r$ ). Эти управления связаны с основными элементарными поведением для МР: поиском цели и обходом препятствий. Элементарные поведения имеют фиксированные структуры, которые содержат минимум нечетких правил для простоты интерпретации и оперативности управления.

Каждое поведение представляется базой правил с двумя входами  $x_1$ ,  $x_2$  и двумя выходами, имеющей следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{«Если } x_1 \text{ есть } A_1^i \text{ и } x_2 \text{ есть } A_2^i, \\ \text{то } \alpha \text{ есть } B_1^i \text{ и } V_r \text{ есть } B_2^i \text{»}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для НР типа ТС нулевого порядка символические величины выводов редуцированы до констант или численных значений для  $\alpha$  и  $V_r$ . Формируемые при этом выходы имеют следующий вид:

$$V_r = \sum_{i=1}^N w_i V_{ri}; \quad \alpha = \sum_{i=1}^N w_i \alpha_i, \quad (3)$$

где  $w_i$  – значение правдоподобия правила  $i$ , вычисляемого по Т-норме по следующему уравнению:

$$w_i = \mu_{A_1}(x_1) * \mu_{A_2}(x_2), \quad (4)$$

где  $A_1^i$  и  $A_2^i$  – параметры функций принадлежности входов  $x_1$  и  $x_2$ .

Рассмотрим два типа стратегий управления поведением МР в зависимости от наличия или отсутствия препятствий в зоне прямого наблюдения:

С1 – стратегия управления МР при непосредственном движении к цели;

С2 – стратегия управления МР при обходе препятствий.

Стратегия С1 позволяет реализовать действие «движение к цели» МР на основе знания его положения относительно координат навигационной среды (т.е. сориентировать робот по направлению к цели). Определение точки цели осуществляется с двух входных переменных – расстояния между МР и целью ( $d_{rf}$ ) и угла между текущей ориентацией МР и текущей ориентацией цели ( $\theta_{rf}$ ) (рис. 4.3). Предлагаемая структура системы управления роботом при движении к цели приведена на рис. 2.

Модуль М1 сравнивает реальные координаты МР с координатами цели, чтобы рассчитать расстояние «МР – цель» и угол предполагаемого движения  $\theta_d$ .

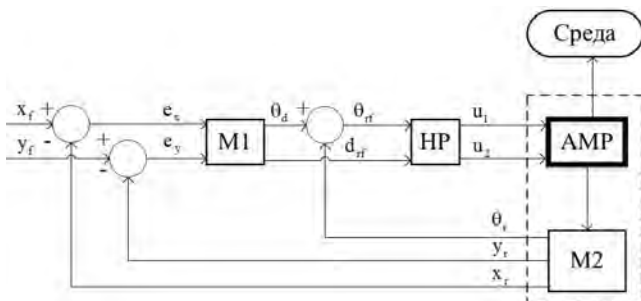


Рис. 2. Структура системы управления МР при стратегии С1

Затем это значение угла сравнивается с текущей ориентацией МР для расчета угла между осью МР и целью ( $\theta_{rf}$ ) по следующим формулам:

$$d_{rf} = \sqrt{(x_f - x_r)^2 + (y_f - y_r)^2}, \quad (5)$$

$$\theta_d = \arctg\left(\frac{y_f - y_r}{x_f - x_r}\right), \quad (6)$$

$$\theta_{rf} = \theta_d - \theta_r. \quad (7)$$

Предлагаемый НР использует две переменные ( $d_{rf}$  и  $\theta_{rf}$ ) для вычисления двух управлений:  $u_1$  (угол поворота переднего колеса  $\alpha$ ) и  $u_2$  (скорость перемещения МР  $V_r$ ).

Функции принадлежности, используемые для фаззификации входных переменных, приведены на рис. 3 и 4 для треугольной и трапециевидной форм соответственно. Функции принадлежности для двух управляющих воздействий (расстояния от МР до цели и угла между текущей ориентацией МР и текущей ориентацией цели) представлены мгновенными импульсами (рис. 5 и 6).

На рис. 3 – 6 использованы следующие обозначения лингвистических переменных входа и выхода системы: Z (Zero), S (Small), M (Middle), B (Big), VB (Very Big), NG (Negative Big), NM (Negative Middle), NP (Negative Small), PS (Positive Small), PM (Positive Middle) PB (Positive Big), L (Low).

На основе описания системы управления с помощью лингвистических переменных и заданных функций принадлежности для переменных входа и выхода можно сформировать правила вывода. Связь между различными переменными входа и выхода для рассматриваемой системы может быть представлена с помощью 35 правил. Таблица 1 описывает нечеткие правила для реализации поведения МР при движении к цели.

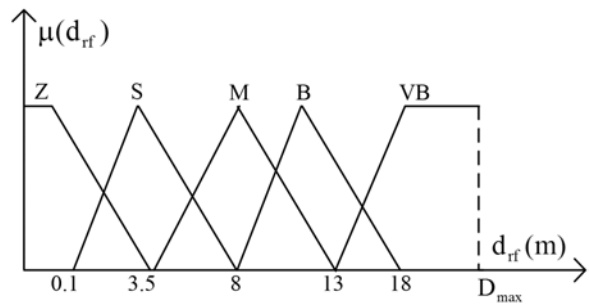


Рис. 3. Функции принадлежности для  $d_{rf}$

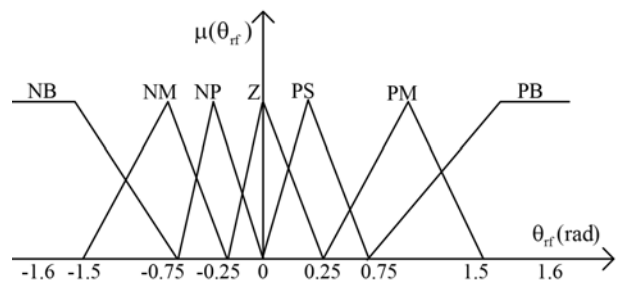


Рис. 4. Функции принадлежности для  $\theta_{rf}$

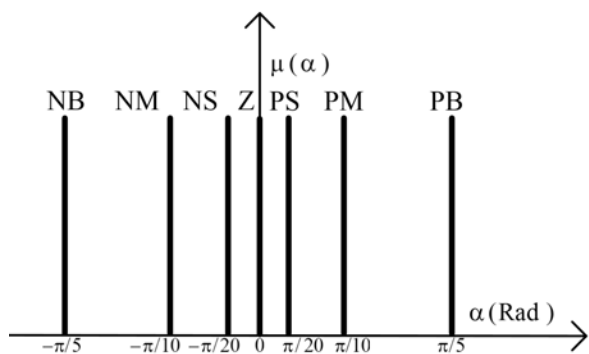


Рис. 5. Функции принадлежности для  $\alpha$

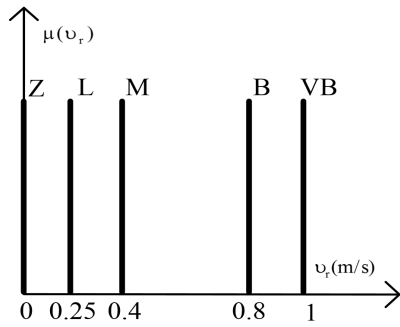


Рис. 6. Функции принадлежности для  $V_T$

Рассматриваемое поведение МР позволяет реализовать автономную навигацию МР при движении к цели, если робот не получает никакой информации от перцептуальных датчиков, а ближайшая окружающая среда не содержит препятствий. Такое условие является достаточно мягким с точки зрения среды, в которой МР реализует свою миссию.

Таблица 1

Нечеткие правила для стратегии С1

Действия ( $\alpha, V_T$ )	$\theta_{rf}$	$\theta_{rf}$							
		B	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
$d_{rf}$	Z	$\alpha$	PB	PS	Z	Z	Z	NS	NM
	$V_T$	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
S	$\alpha$	PB	PB	PM	Z	NM	NB	NB	NB
	$V_T$	L	L	L	L	L	L	L	L
M	$\alpha$	PM	PM	PS	Z	NM	NB	NB	NB
	$V_T$	L	L	M	M	M	L	L	L
B	$\alpha$	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
	$V_T$	L	M	B	B	B	M	L	L
VB	$\alpha$	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM
	$V_T$	L	M	B	VB	B	M	L	L

В случае наличия препятствий (статических или динамических), которые препятствуют движению МР к цели, робот должен иметь эффективную возможность их обхода.

Рассмотрим стратегию С2, при которой генерируются адекватные действия для избежания столкновений с однотипными (простыми) препятствиями, если в окрестности МР обнаруживаются один или несколько объектов с помощью перцептуальных средств (прямо, справа или слева).

Будем рассматривать две структуры управления для эволюции МР в пространстве с препятствиями. Первая структура основана на одном типе поведения при обходе препятствий и использует измерения расстояния и угла между центром МР и препятствием. При этом предполагается, что препятствия имеют форму круга (зона риска столкновения определяется окрестностью вокруг центра препятствия). Во второй структуре используется система управления, основанная на наборе из пяти пове-

дений для выполнения задачи автономной навигации МР при различных типах окружающей среды.

Первая реализуемая стратегия основана на использовании НР, который может после измерения расстояния  $D_{ro}$  и угла  $\theta_o$  (рис. 1) формировать управления, необходимые для обхода замеченных препятствий ( $U_o$ ). Здесь  $D_{ro}$  – расстояние между МР и наиболее близким препятствием;  $\theta_o$  – относительный угол между осью МР и препятствием;  $U_o$  – вектор, содержащий угол поворота ( $\alpha$ ) и скорость перемещения ( $V_T$ ). Это НР типа Т-С нулевого порядка, который может быть использован для менее сложной среды с однотипными препятствиями

На рис. 7 представлена предлагаемая архитектура автономной навигации МР. Здесь использована система управления, основанная на двух типах поведения (движение к цели и обход препятствий) с блоком простой координации для выбора одного из двух регуляторов. Глобальная задача навигации реализуется активацией одного из следующих типов поведений: движение к цели или обход препятствий в трех направлениях (прямо, направо и налево). Используя измерения датчиков, блок М1 позволяет определить входные переменные нечетких переменных.

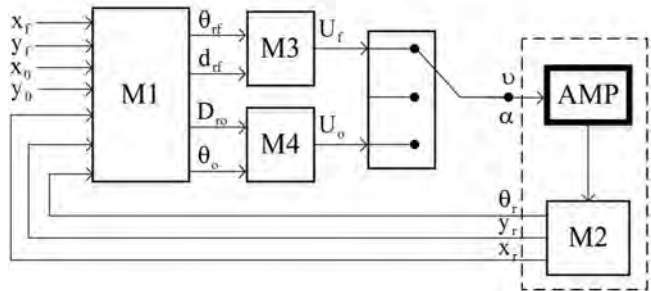


Рис. 7. Структура системы управления МР при стратегии С2

Функции принадлежности, используемые для фазификации каждого из входов, приведены на рис. 8 и 9 соответственно, где использованы следующие обозначения лингвистических переменных: Z (Zero), S (Small), M (Middle), B (Big), NG (Negative Big), NM (Negative Middle), NS (Negative Small), PS (Positive Small), PM (Positive Middle), PB (Positive Big).

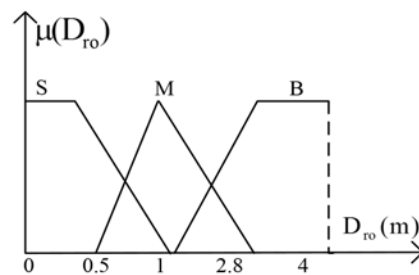


Рис. 8. Структура системы управления МР при стратегии С1

Соответствующая база из 21 нечетких правил приведена в табл. 2.

Таблица 2  
Нечеткие правила для стратегии С2

$\alpha$	Угол $\theta_0$								
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
D	S	$\alpha$	NM	NM	NB	NB	PB	PM	PM
		$V_r$	L	L	Z	Z	Z	L	L
M		$\alpha$	NS	NM	NB	NB	PB	PB	PS
		$V_r$	M	M	L	L	L	M	M
B		$\alpha$	Z	Z	NM	NM	PM	Z	Z
		$V_r$	M	M	M	M	M	M	M

Рассмотрим стратегию С3, при которой генерируются адекватные действия в случае, когда окружающая среда МР может содержать препятствия различной формы (многоугольники, стены, эллипсы и т.п.). При этом МР должен иметь возможность эффективного обхода этих препятствий без столкновений. Возникает необходимость сбора правильной и точной информации о среде для осуществления навигации с учетом формы препятствий. Архитектура предлагаемого навигатора представлена на рис. 9.

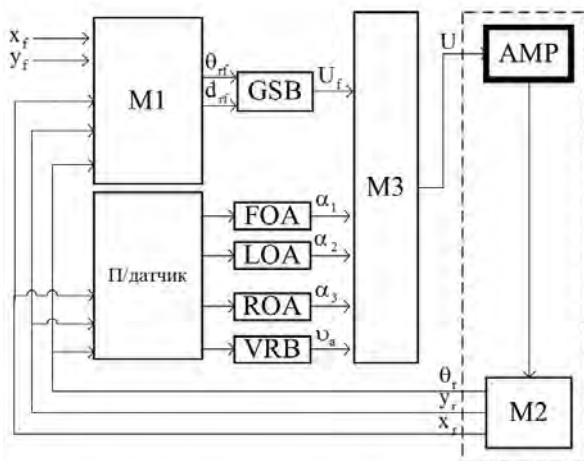


Рис. 9. Структура системы управления МР при стратегии С3

Он состоит из блоков, учитывающих 5 типов нечеткого поведения по модели Т-С нулевого порядка: «движение к цели» (Goal Seeking Behavior - GSB), «обход препятствий, расположенных прямо» (Front Obstacle Avoider - FOA), «обход препятствий, расположенных справа» (Right Obstacle Avoider - ROA), «обход препятствий, расположенных слева» (Left Obstacle Avoider - LOA) и «уменьшение скорости движения» (Velocity Reducing Behavior VRB). Все эти типы поведения связано простым супервизором координации для выработки наилучшего управления действиями МР. Для этого предположим, что МР имеет 7 ультразвуковых датчиков для обнаружения препятствий в трех направлениях (прямо, справа и слева).

Для трех регуляторов обхода препятствий используется рассмотренное ранее распределение нечетких диапазонов для различных датчиков, где лингвистическая переменная «расстояние» определяется двумя нечеткими наборами: N (Near-Близко) и F (Far-Далеко), как показано на рис. 10. Определим функции принадлежности для трех параметров:  $d_m$  - минимальное расстояние до объекта, может меняться с изменением скорости МР;  $d_s$  - расстояние безопасности, до которого МР может передвигаться на высокой скорости;  $d_{max}$  - максимальное расстояние, измеряемое датчиком.

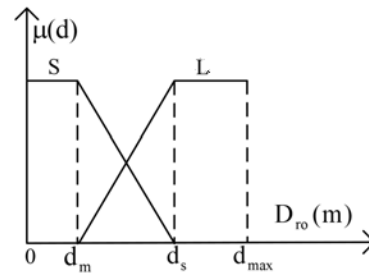


Рис. 10. Функции принадлежности для  $D_{r0}$

Для выходной переменной «угол поворота» используются те же нечеткие наборы импульсов, как и для типа поведения «движение к цели» (рис. 6). Три входных расстояния для каждого регулятора позволяют определить 8 ситуаций, тут же интерпретируемых и для которых выбирается лучшее из решений. Используемые нечеткие правила представлены в табл. 3 – 5.

Таблица 3  
Нечеткие правила для модуля FOA

Угол $\alpha$		Расстояние $d_3$				
		S	L			
$d_2$		Расстояние $d_1$				
		S	L	S	L	
$d_2$	L	$\alpha$	NB	NM	NB	Z
	S	$\alpha$	NB	NM	PB	PB

Таблица 4  
Нечеткие правила для модуля ROA

Угол $\alpha$		Расстояние $d_6$				
		S	L			
$d_2$		Расстояние $d_4$				
		S	L	S	L	
$d_2$	L	$\alpha$	PM	Z	PM	Z
	S	$\alpha$	PB	PM	PB	PM

Таблица 5  
Нечеткие правила для модуля LOA

Угол $\alpha$		Расстояние $d_7$				
		S	L			
$d_3$		Расстояние $d_5$				
		S	L	S	L	
$d_3$	L	$\alpha$	NM	NM	NM	Z
	S	$\alpha$	NB	NM	NB	NM

В соответствии с выбранной структурой системы управления МР (рис. 9), если среда свободна от препятствий, то супервизор для выбора действий ( $\alpha$  и  $V_r$ ) использует только регулятор движения к цели. В случае наличия препятствий будет активизироваться в соответствии с возникшей ситуацией один из типов поведений для избежания столкновений, а параллельно с этим активизируется задание скорости перемещения. МР должен снизить скорость в случае окружающего препятствия. Для этого общая архитектура навигатора модифицируется путем добавления нечеткого регулятора, который задает уменьшение скорости движения (Velocity Reducing Behavior – VRB). Его задачей является генерирование величины настройки текущей скорости МР ( $V_a$ ). Эта величина добавляется к текущему значению для снижения скорости в соответствии со следующим рекуррентным уравнением:

$$V_r(k+1) = V_r(k) + V_a(k) \quad (8)$$

Входными переменными при этом являются текущая скорость МР ( $V_r$ ) и минимальное расстояние до ближайшего препятствия ( $D_{min}$ ). Фаззификация входов осуществляется следующим образом:

– для скорости используются три нечетких набора (рис. 11) со следующими лингвистическими переменными: L (Low), M (Middle) и B (Big).

– расстояния фаззифицируются с помощью двух функций принадлежности: N (Near-Близко) и F (Far-Далеко), как показано на рис. 12.

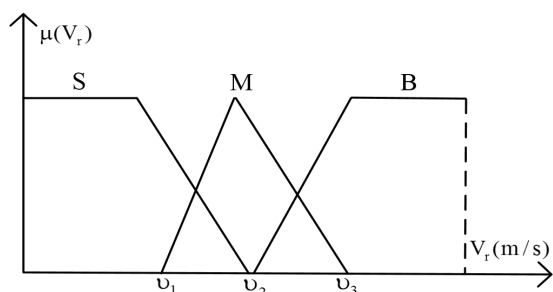


Рис. 11. Функции принадлежности для  $V_r$

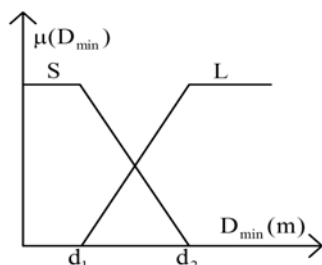


Рис. 12. Функции принадлежности для  $D_{min}$

Величина коррекции скорости распределяется в соответствии с рис. 13. Обозначения уровней выхода: DI (существенное уменьшение), D (уменьшение), AC (отсутствие изменений), A (увеличение) и AI (существенное увеличение).

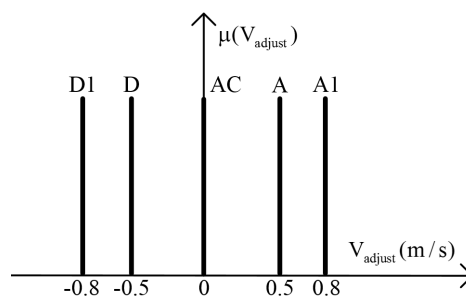


Рис. 13. Функции принадлежности для  $V_a$

Использование такого распределения позволяет сформировать таблицу изменений скорости с применением шести нечетких правил (табл. 6).

Таблица 6

Нечеткие правила для модуля LOA

Скорость AMP		Расстояние $D_{min}$		
		S	L	
Скорость	Низкая	$V_r$	AC	A
	Средняя	$V_r$	D	AC
	Высокая	$V_r$	DI	DI

### Результаты моделирования

Рассмотрим примеры моделирования навигации МР в различных средах для подтверждения эффективности предложенных схем управления. Используемая среда учитывает ограничения моделирования и движения МР в различных ситуациях, в том числе, в свободном пространстве и в пространстве со статическими препятствиями.

**Стратегия С1.** Когда п-датчики робота не фиксируют никаких препятствий перед МР, то задача сводится к непосредственной ориентации к цели для ее последующего достижения (свободной навигации к цели). Для различных точек старта и финиша МР были получены траектории МР при различных конфигурациях (рис. 14).

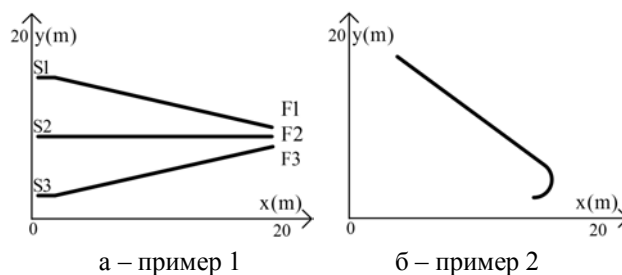


Рис. 14. Траектория МР для стратегии С1

Как видно из рис. 14, МР автономно перемещается из исходного положения (Start:  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ) в целевую точку (Finish:  $F_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ) в каждой из ситуаций. Разработанный НР позволяет генерировать наиболее приемлемые управления для эффективной реализации стратегии С1. Скорость МР уменьшается при приближении к цели. На рис. 14, б представлен другой пример свободной навигации к цели.

Если наблюдается изменение осуществляемых управлений (рис. 15), на старте, когда МР находится далеко от цели, МР вырабатывает максимальное действие угла поворота для поворота направо по направлению к цели.

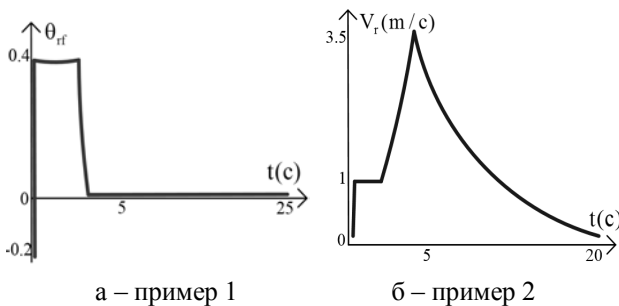


Рис. 15. Управление скоростью движения МР для стратегии С1

Затем угол уменьшается до нуля (МР имеет одно и то же направление к цели). Скорость перемещения для первых этапов с поворотом является низкой, она увеличивается до максимума, пока цель еще далеко, а затем она уменьшается до нуля, когда МР приближается к цели. Полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными для рассматриваемого типа поведения.

**Стратегия С2.** Если среда МР содержит одно или несколько препятствий, то он должен иметь возможность обойти их без столкновений. Как было отмечено выше, система автономной навигации поддерживает два элементарных типа поведения: (движение к цели (тип 1) и обход препятствий (тип 2). МР осуществляет адекватное действие для достижения финального результата, избегая столкновения с препятствиями, выбирая один из этих двух типов поведения в соответствии с текущей замеченной ситуацией. На рис. 16 приведен пример навигации МР в присутствии препятствий в окружающей среде. МР перемещается к цели, когда одно из препятствий детектировано, с одной из трех сторон (анфас, направо или налево). При этом активизируется поведение «обход препятствия» для выработки соответствующих управлений и реализации действий, позволяющих избежать столкновения.

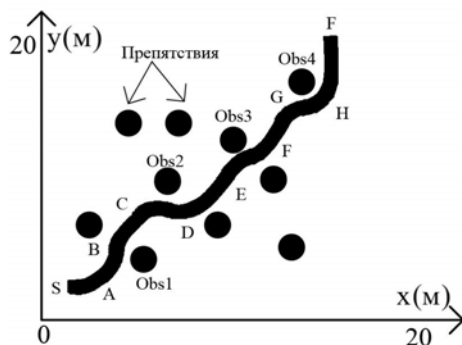


Рис. 16. Траектория МР для стратегии С2 (пример 1)

Как видно из рис. 16, во всех случаях МР успешно выполняет автономную навигацию и может эффективно достичь цели, обходя препятствия независимо от точки старта.

Получаемая траектория движения и действия МР показывают, что предлагаемая система управления обеспечивает хорошие показатели качества.

В примере на рис. 16 МР должен достичь цели F1, стартуя из начальной точки S1. МР начинает осуществлять действия в соответствии с одним из активизированных типов действий (в зависимости от текущей ситуации). Прежде всего МР перемещается к цели, активизируя тип поведения (и соответствующий регулятор) «движение к цели» с максимальной скоростью до момента фиксации датчиком препятствия 1 (Obs 1) с правой от себя стороны, затем он в точке А меняет тип своего поведения на «обход препятствий» до точки В. После точки В МР получает свободное пространство и перемещается до точки С по поведению «движение к цели». В точке С МР замечает препятствие 2 (Obs 2) и реализует поведение «обход препятствий» вплоть до точки D, поворачивая направо. В точках E, F, G и H реализуется аналогичная стратегия МР.

В конечном итоге на финишном отрезке активизируется поведение «движение к цели» с уменьшением скорости движения при приближении к цели. Координация двух типов поведения осуществляется специальным модулем.

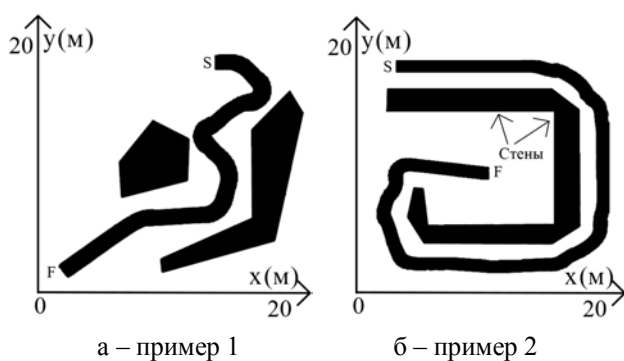
Использование такого типа регуляторов дает приемлемые результаты для среды с однотипными препятствиями. Но в сложных средах, где препятствия могут иметь различные формы, необходимо использовать другие типы датчиков и регуляторов.

**Стратегия С3.** Рассмотрим стратегию управления С3 для автономной навигации МР, основанная на применении пяти типов нечеткого поведения для обхода препятствий различной формы в трех направлениях и датчиков другого типа (ультразвуковых или инфракрасных).

На рис. 17, а приведен пример автономной навигации МР в неизвестной среде.

В процессе движения МР должен достичь заданной цели. Когда МР фиксирует препятствие по дороге к цели, он должен иметь возможность их обойти, активизируя соответствующий тип поведения по результатам измерения расстояний.

На рис. 17, б приведен пример, когда задачей МР является достижение цели при наличии окружающей ее препятствий U-образной формы. В процессе движения МР проходит параллельно стене до момента, когда ошибка ориентирования входит в пределы интервала, определяющего видимость. Далее МР начинает движение к цели.



а – пример 1                      б – пример 2  
Рис. 17. Траектория МР для стратегии СЗ

Рис. 17 подтверждает, что МР для всех конфигураций препятствий достигал цели с обходом препятствий.

## Выводы

В статье предложен подход к решению проблемы движения колесного МР в среде с препятствиями.

Рассмотренные системы управления основаны на нечетком поведении, где глобальная задача навигации декомпозирована на совокупность простых подзадач.

Нечеткая логика может быть эффективно использована создания регуляторов со специфическими свойствами. Она позволяет вырабатывать управляющие воздействия даже в случае неопределенности измерений. Для простоты и эффективности была использована архитектура, основанная на типах поведения, для которых система управления является модульной и адаптированной к визуализации. Для координации типов поведения применяются простые супервизорные блоки. Представленные результаты моделирования дают приемлемые решения для автономной навигации МР, особенно в менее сложных средах.

Во всех рассмотренных случаях МР достигает цели, обходя препятствия.

Применение нечетких систем управления требует учитывать опыт предыдущих разработчиков, чтобы выбрать наилучшую концепцию для этого типа регуляторов. Нечеткая логика является достаточно мощным и простым в применении инструментом. Однако НР присущи некоторые недостатки: необходимость оценивать параметры регуляторов (функции принадлежности входов и выходов; таблицы выводов). Регулирование различных параметров в окружающей среде позволяет объединить хорошие результаты для этой среды и не отвечать правильно на новую ситуацию.

Путем повышения адаптируемости систем навигации можно прийти к реализации автоматического обучения для настройки и формирования параметров НР.

## Список литературы

1. Ермолов И.Л. Автономность мобильных роботов, ее сравнительные меры и пути повышения / И.Л. Ермолов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 6. – С. 23-28.
2. Fahimi F. *Autonomous Robots. Modeling, Path Planning and Control* / F. Fahimi. – New York : Springer, 2009. – 348 p.
3. Черноножкин В. А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов / В.А. Черноножкин, С.А. Половко // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 57. – С. 13-22.
4. Cherroun L. *Designing of Goal Seeking and Obstacle Avoidance Behaviors for a Mobile Robot Using Fuzzy Techniques* / L. Cherroun, M. Boumehras // *Journal of Automation and Systems Engineering (JASE)*. – 2012. – Vol. 6, no. 4. – P. 164-171.
5. Удовенко С.Г. Гибридные методы машинного обучения в системах управления динамическими объектами / С.Г. Удовенко, А.А. Гришко, Л.Э. Чалая // Біоніка інтелекту. – 2012. – № 1 (78). – С. 78-84.

Поступила в редколлегию 15.01.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Г. Руденко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## СТРАТЕГІЇ НЕЧІТКОГО КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

С.Г. Удовенко, А.Р. Сорокін

Стаття присвячена розробці системи навігації автономних мобільних роботів з нечіткими стратегіями управління. Запропонований метод дозволяє реалізувати різні типи поведінки колісного робота в умовах наявності і відсутності проприоцептивної інформації. Для координації типів поведінки застосовуються прості супервизорні блоки. Реалізовані роботом дії засновані на вимірюваннях датчиків для визначення положення цілі і вимірювання відстані до перешкоди. Обчислювальна трудомісткість запропонованого методу дозволяє його реалізувати в реальному масштабі часу.

**Ключові слова:** мобільний робот, нечітка система, навігація, стратегії управління, нечіткий регулятор.

## FUZZY CONTROL STRATEGIES FOR A WHEELED MOBILE ROBOT

S.G. Udovenko, A.R. Sorokin

The given work is devoted to development of fuzzy control strategies in the tasks of navigation of autonomous mobile robots. The variants of the fuzzy control systems, realizing two behavior types of autonomous robot, are considered: motion to the goal and obstacle avoidance. The structure of these systems contains the block of coordination, allowing in accordance with a situation to choose effective strategy. Application of the presented approach allows to take into account the configurations of obstacles in the conditions of presence of proprioceptive information.

**Keywords:** mobile robot, fuzzy system, navigation, control strategies, fuzzy controller.