

УДК 658.5.012

НЕЧЕТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧАХ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СКЛАДСКИХ ПОГРУЗЧИКОВ*

Г.Н. Рогачев¹, Н.Г. Рогачев²

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: grogachev@mail.ru

ООО «ССИ-Шефер»
Россия, 443001, г. Самара, ул. Галактионовская, 157
E-mail: rogachev8@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена процедура нечеткой оптимизации применительно к проблеме построения траекторий роботизированных складских погрузчиков в изменяющейся среде для ряда типичных ситуаций, отличающихся целями функционирования погрузчиков и ограничениями, налагаемыми как на ресурсы управления, так и на поведение объектов управления. Одновременно с построением траекторий погрузчиков осуществляется синтез алгоритмов работы цифровых регуляторов систем управления погрузчиками как гибридных непрерывно-дискретных систем. Процедура построения систем управления с нечеткими целями их работы и нечеткими ограничениями базируется на представлении алгоритмов управления в виде априори не фиксируемых и переменных во времени систем правил.

Ключевые слова: роботизированный складской погрузчик, нечеткая оптимизация, гибридная непрерывно-дискретная система, численная процедура, система правил.

Одним из важных направлений современного развития теории управления является исследование гибридных непрерывно-дискретных систем управления. В таких системах компоненты с непрерывными сигналами отражают физические законы, технологические или технические принципы, которым подчинено функционирование объектов управления, а дискретные элементы моделируют работу цифровых управляющих устройств [1]. К гибридным относится широкий круг управляемых объектов, охватывающий как традиционные, так и новейшие технологии в самых различных областях техники. Цель работы – демонстрация эффективности процедуры нечеткой оптимизации применительно к проблеме синтеза цифровых регуляторов для одного класса гибридных непрерывно-дискретных систем управления. Рассматриваемый метод построения систем управления с нечеткими целями их работы и ограничениями, налагаемыми как на ресурсы управления, так и на поведение объектов управления в меняющемся окружении, базируется на представлении алгоритмов управления в виде априори не фиксируемых и переменных во времени систем правил. Метод обеспечивает построение в темпе с управляемым процессом непосредственно на цифровом

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Самарской области (проекты №№ 117-48-630410 p_a, 18-08-00506 А).

Геннадий Николаевич Рогачев (д.т.н.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Николай Геннадьевич Рогачев, системный аналитик.

регуляторе реализующих эти алгоритмы вычислительных процедур, формируемых по информации о свойствах среды с учетом особенностей, обусловленных цифровым характером устройств управления и сетевым способом обмена информацией между ними [2, 3]. Объекты управления – роботизированные складские погрузчики – являются многомерными нелинейными объектами управления. Среда, в которой они перемещаются, содержит как неподвижные объекты (целевые точки, обязательные для посещения с целью перемещения между ними грузов, препятствия), так и подвижные (другие складские погрузчики). Разработанные алгоритмы управления обеспечивают в условиях меняющегося окружения выполнение целей и ограничений, сформулированных в виде набора нечетких требований самого общего характера к виду и качеству переходных процессов.

Задачу синтеза цифровых регуляторов гибридных непрерывно-дискретных систем управления предлагается решать численно. Применительно к целому ряду прикладных задач синтеза (в том числе оптимального) компьютерных систем управления исходные требования к целям их работы и имеющиеся ограничения позволяют либо осуществить предварительную конечномерную параметризацию некоторых элементов системы продукции, определяющей алгоритм работы искомого регулятора, либо определить набор элементарных функций, из которых будет строиться решение. Численная процедура синтеза алгоритма работы регуляторов основана на использовании методов конечномерной оптимизации для определения структуры продукционных правил и содержания системы продукции. Этот подход позволит в перспективе создавать технические устройства, которые будут самостоятельно генерировать алгоритмы работы своих систем управления и при необходимости модернизировать их. На базе этого подхода можно будет создать программные средства, которые автоматизируют весь процесс проектирования систем управления – от постановки задачи до моделирования их работы, включая проверку программного обеспечения.

Примером промышленной реализации гибридных непрерывно-дискретных систем управления являются роботизированные складские погрузчики. Каждый погрузчик как элемент подвижной части системы является непрерывным многомерным нелинейным объектом управления. Мобильность обеспечивается колесным роботом. Кинематическая модель колесного робота – система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$[\dot{x}, \dot{y}, \dot{\varphi}]^T = [v \cdot \cos(\varphi), v \cdot \sin(\varphi), w]^T, \quad (1)$$

где переменные состояния – это две координаты x и y положения объекта на плоскости и угол φ направления вектора скорости.

Управляющими воздействиями являются модуль вектора линейной скорости v и мгновенная скорость поворота вектора скорости w . Примем для определенности $|v| \leq 1$, $|w| \leq 1$.

Требование повышения уровня автоматизации изменило принципы организации и функционирования складов. Складские погрузчики модернизируются для достижения большей эффективности и обеспечения безопасности в процессе эксплуатации. Достижения в области сенсорных и компьютерных технологий предоставляют возможности для разработки автономных беспилотных погрузчиков. В последние годы было проведено большее число исследований по теме навигации беспилотных транспортных

средств [4–6]. Перспективным способом решения возникающих при этом проблем является использование методов искусственного интеллекта [7]. Одним из рассмотренных автором вариантов является применение эволюционных вычислений [8, 9].

В данной работе для навигации роботизированных складских погрузчиков как беспилотных транспортных средств предлагается использовать процедуру нечеткой оптимизации в задачах построения траекторий погрузчиков в изменяющейся среде для ряда типичных ситуаций, отличающихся целями функционирования погрузчиков и ограничениями, налагаемыми как на ресурсы управления, так и на поведение объектов управления в меняющемся окружении. Одновременно с построением траекторий погрузчиков осуществляется синтез алгоритмов управления в виде систем правил работы цифровых регуляторов, которые обеспечивают движение роботизированных складских погрузчиков по найденным траекториям.

В последнее время нечеткая технология завоевывает все больше сторонников среди разработчиков систем управления. Тенденция распространения нечетких систем управления легко объяснима. Многие современные задачи управления, которые не могут быть решены классическими методами из-за большой сложности математических моделей, описывающих процессы, неопределенности целей управления и ограничений, успешно решаются средствами нечеткой логики. Нечеткая логика в задачах управления может использоваться двояко: возможно построение систем управления с нечеткими правилами работы регулятора либо синтез систем управления с нечеткими целями и ограничениями [10].

Первый вариант – нечеткие системы управления – основан на правилах продукционного типа, посылки и заключения сформулированы в терминах нечетких лингвистических высказываний. В работе рассмотрен второй вариант использования нечеткой логики – для построения систем управления с нечеткими целями и ограничениями. В этом случае осуществляется выбор такой альтернативы, которая удовлетворяет в максимальной степени и нечетким целям, и нечетким ограничениям. Когда цель и ограничение конфликтуют между собой, не существует альтернативы, которая полностью удовлетворяет и цели, и ограничения. В качестве решения в таких случаях обычно выбирают альтернативу с максимальной степенью принадлежности. Решается проблема, которая требует, чтобы и целевая функция, и ограничения удовлетворяли в максимально возможной степени некоторым условиям, представленным нечеткими величинами, каждая из которых определена соответствующей функцией принадлежности. Это дает наилучшее компромиссное решение, представляющее наилучший вариант степеней удовлетворения целевым функциям и ограничениям. Такой подход может быть особенно полезен для решения реальных проблем, где цели и ограничения выражены вербально. При таком подходе можно решать и задачи с заведомо невыполнимыми точно условиями, т. е. задачи, в которых можно добиться лишь приближенного обеспечения всей совокупности требований. Традиционно процедура синтеза системы правил работы программного регулятора предполагает формулировку ее как задачи математического программирования вида

$$\min_{z \in Z} f(z), g_i(z) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Проблема (2) может быть расширена так, что границы, которые отделяют приемлемые решения от неприемлемых, являются размытыми, а степени приемлемости отдельных решений представлены нечеткими числами. Для этого целевая функция и ограничения должны пониматься в нечетком смысле [11]. При использовании обозначений, используемых в области нечеткой оптимизации, нечеткая версия проблемы (2) может быть записана так:

$$\begin{aligned} \min_{z \in Z} f(z), \\ g_i(z) \tilde{\geq} 0, i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (3)$$

где $z \in Z^*$ – искомое решение;
 $f(z)$ – целевая функция, минимизируемый критерий качества;
 $g_i(z)$ – уравнения связи или ограничения, волнистая черта « $\tilde{\sim}$ » – символ нечеткой операции.

Пусть функции принадлежности $\mu_i(\cdot), i = 0, 1, \dots, m$ представляют степени выполнения цели и ограничений. Решение оптимизационной задачи (3) должно удовлетворять насколько возможно и цели, и ограничениям, т. е. максимизировать минимальное из значений $\mu_i(\cdot), i = 0, 1, \dots, m$. Нечеткая проблема математического программирования (3) может быть преобразована [12] в задачу вида

$$\max_{z \in Z} C(z), \quad (4)$$

где $C(z)$ представляет глобальную степень удовлетворения решением z цели и ограничений:

$$C(z) = \min \{v_0, v_1, \dots, v_m\}, \quad (5)$$

где $v_0 = \mu_0(f(z)), v_i = \mu_i(g_i(z)), i = 1, 2, \dots, m$

Окончательно нечеткая проблема (5) приобретает вид определения такого решения $z \in Z$, которое обеспечивает

$$\max_{z \in Z^*} \min_i (v_i), i = 0, 1, \dots, m, \quad (6)$$

где $v_0 = \mu_0(f(z)), v_i = \mu_i(g_i(z)), i = 1, 2, \dots, m$, функции принадлежности $\mu_0(\cdot), \mu_i(\cdot), i = 1, 2, \dots, m$ представляют степени выполнения цели и ограничений соответственно. Далее задача (5) решается известными численными методами.

В этой статье эффективность процедуры нечеткой оптимизации в задачах построения траекторий погрузчиков и синтеза алгоритмов управления ими демонстрируется рядом примеров, отличающихся целями функционирования погрузчиков и ограничениями со стороны ресурсов управления и внешней среды. Так, рассмотрена задача перемещения погрузчика из начального положения в требуемое конечное при наличии некоторой обязательной для посещения промежуточной точки. Это – задача забрать груз в одной точке склада и переместить его в другую. Общей во многих областях, включая навигацию и робототехнику, является проблема предотвращения столкновений транспортных средств друг с другом. Для складских помещений в условиях ограниченного объема и высокой плотности транспортного потока эта проблема весьма актуальна. Совместное планирование движения транспортных средств

может эффективно предотвратить угрозу столкновения. Такая задача рассмотрена в статье для двух случаев: когда траектория одного из погрузчиков стеснена и когда ограничений на перемещения нет.

В качестве первого характерного примера рассмотрена задача синтеза траектории и системы правил работы регулятора в задаче управления роботизированным складским погрузчиком (1) с нечеткой целью и ограничениями, которые сформулированы следующим образом. Необходимо по кратчайшему пути $L = \int_0^{t_2} \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} dt \rightarrow \min$ за время t_2 перевести объект управления (1) из точки фазового пространства с координатами $(x_0, y_0, \varphi_0) = (0, 0, 0)$ в точку TP2 с координатами $(x_2, y_2, \varphi_2) = (0, 4, \pi)$, перед этим посетив точку TP1 с координатами $(x_1, y_1) = (4, 4)$. Этот вариант задачи коммивояжера соответствует в складских условиях требованию к погрузчику переместиться в точку хранения груза TP1, забрать его и доставить по назначению в точку TP2.

Функции принадлежности нечетких множеств заданы аналитически:

$$\mu_0(L) = \frac{1}{1 + e^{(L-20)^2}}; \quad L = \int_0^{t_2} \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} dt;$$

$$\mu_1(\rho_1) = e^{-2\rho_1^2}; \quad \rho_1 = \min_{t \in [0, t_2]} \left((x_{TP1} - x(t))^2 + (y_{TP1} - y(t))^2 \right)^{1/2};$$

$$\mu_2(\rho_2) = e^{-2\rho_2^2}; \quad \rho_2 = \min_{t \in [0, t_2]} \left((x_{TP2} - x(t))^2 + (y_{TP2} - y(t))^2 \right)^{1/2};$$

$$\mu_3(\varphi) = e^{-0.6(\varphi(t_2) - \varphi_2)^2}.$$

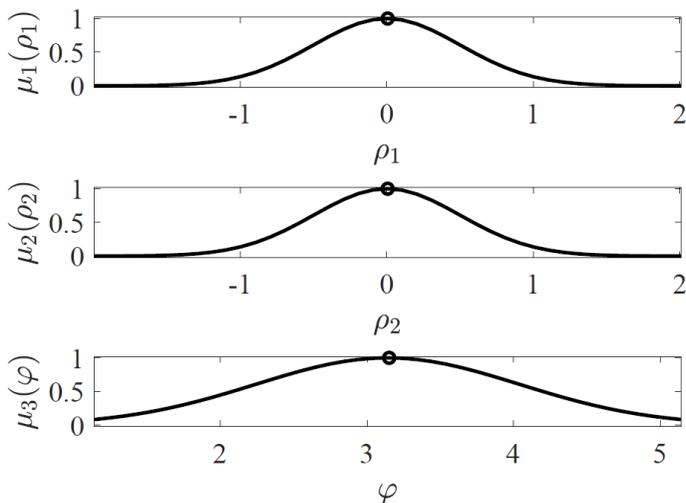


Рис. 1. Графики функций принадлежности $\mu_1 - \mu_3$

На рис. 1 показаны графики функций принадлежности $\mu_1 - \mu_3$. Нечеткое решение найдем из соотношения (6). Систему правил работы цифрового программного регулятора будем искать в виде

$$\text{«если } t \in [i, i+1), \text{ то } v(t) = v_i, w(t) = w_i \text{»}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, t_2 - 1, \quad (7)$$

что соответствует единичной частоте срабатывания регулятора (один раз в единицу модельного времени). На рис. 2, 3 представлены найденная траектория движения роботизированного складского погрузчика и реализующие такое движение управляющие воздействия $v(t)$, $w(t)$. Найденное решение имеет следующие параметры: $L = 10,34$, $t_2 = 11$, степень удовлетворения нечетким требованиям и ограничениям $\mu_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.999$.

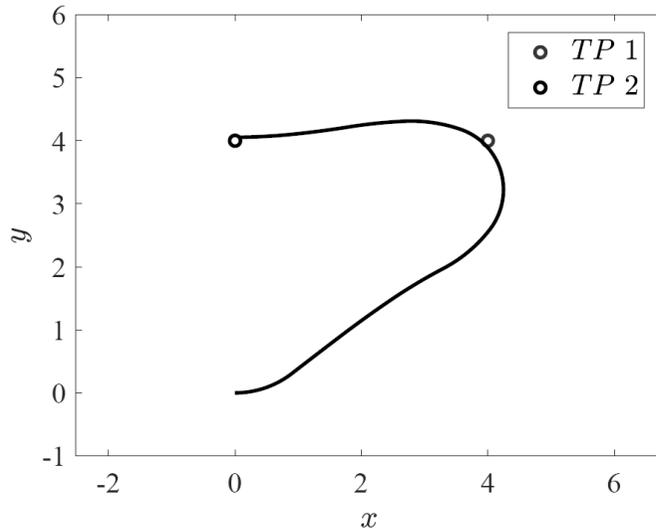


Рис. 2. Нечетко-оптимальная траектория движения роботизированного складского погрузчика

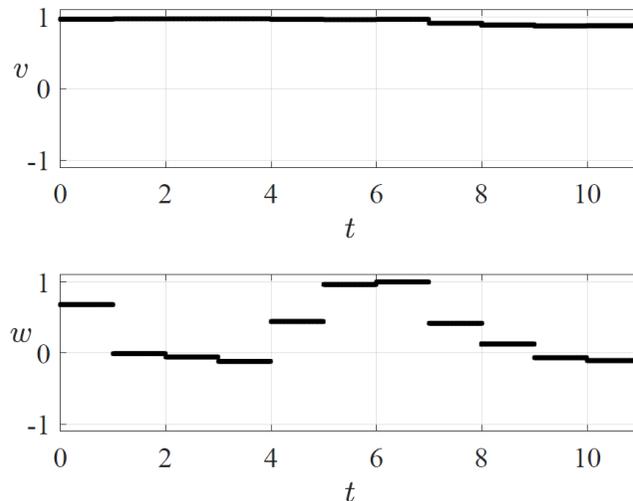


Рис. 3. Управляющие воздействия $v(t)$, $w(t)$, реализующие нечетко-оптимальную траекторию движения складского погрузчика

Для сравнения приведем характеристики маршрута, состоящего из двух локально-оптимальных участков. Найденное решение имеет следующие параметры: $L = 11,63$, $t_2 = 12$, степень удовлетворения нечетким требованиям

и ограничениям составляет 0,97–0,98. Первый локально-оптимальный участок траектории, переход объект управления (1) из точки $(x_0, y_0, \varphi_0) = (0, 0, 0)$ в точку TP1 с координатами $(x_1, y_1) = (4, 4)$, несколько сокращается. Однако общая длина пути больше на 12,5 %, поскольку при оптимизации первой части траектории не учтена необходимость переместиться затем в точку TP2. Следствием этого является значительное удлинение второго локально-оптимального участка. На рис. 4, 5 представлены состоящая из двух локально-оптимальных участков траектория движения роботизированного складского погрузчика и реализующие такое движение управляющие воздействия $v(t)$, $w(t)$.

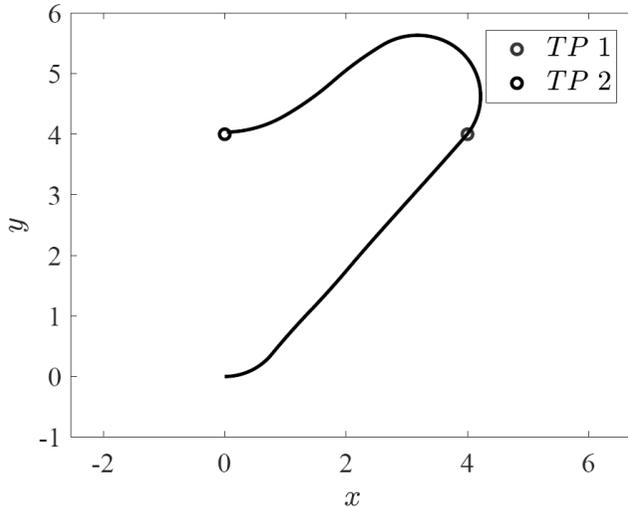


Рис. 4. Локально-оптимальная траектория движения роботизированного складского погрузчика

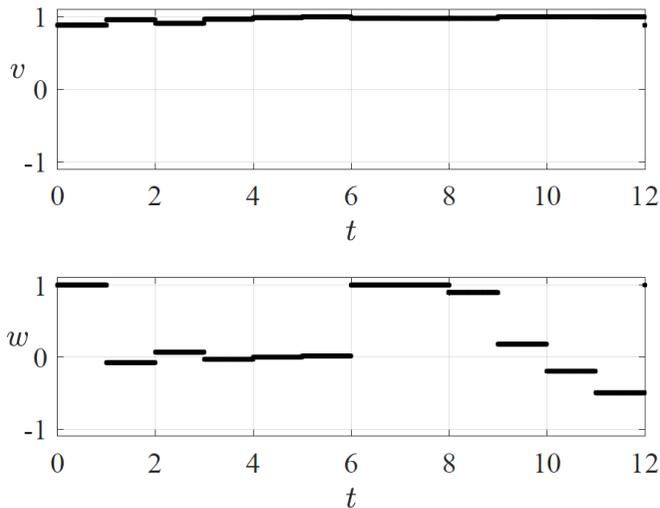


Рис. 5. Управляющие воздействия $v(t)$, $w(t)$, реализующие локально-оптимальную траекторию движения складского погрузчика

Для складских помещений ограниченного объема и высокой плотности транспортного потока весьма актуальна проблема предотвращения столкновений транспортных средств друг с другом. В качестве еще одного примера рассмотрена задача синтеза траекторий и систем правил работы регуляторов в задаче управления двумя роботизированными складскими погрузчиками, перемещающимися навстречу друг другу по потенциально опасным траекториям. Нечеткие условия сформулированы следующим образом: необходимо по кратчайшему пути за определенное время t_1 перевести первый объект управления из точки фазового пространства с координатами $(x_{01}, y_{01}, \varphi_{01}) = (0, 0, 0)$ в точку с координатами $(x_{11}, y_{11}, \varphi_{11}) = (6, 0, 0)$. Одновременно необходимо по кратчайшему пути за время t_2 перевести второй объект управления из точки фазового пространства с координатами $(x_{02}, y_{02}, \varphi_{02}) = (0, 6, \pi)$ в точку с координатами $(x_{12}, y_{12}, \varphi_{12}) = (0, 0, \pi)$. В качестве дополнительного условия необходимо поставить условие обеспечения безопасных маршрутов перемещения, в противном случае требование следовать по кратчайшему пути приведет к столкновению. Это дополнительное условие зададим в виде функции принадлежности $\mu_7(d)$ нечеткого множества допустимых значений расстояния d между погрузчиками:

$$\mu_7(d) = \frac{1}{1 + e^{-3(d^2 - 2)^2}} ; d = \max_{t \in [0, t_1]} \left((x_1(t) - x_2(t))^2 + (y_1(t) - y_2(t))^2 \right)^{1/2}.$$

Характеристики найденного решения, включающего маршруты обоих погрузчиков и алгоритмы управления ими, иллюстрируются рис. 6–8, степень удовлетворения нечетким требованиям и ограничениям составляет 0,97–0,98.

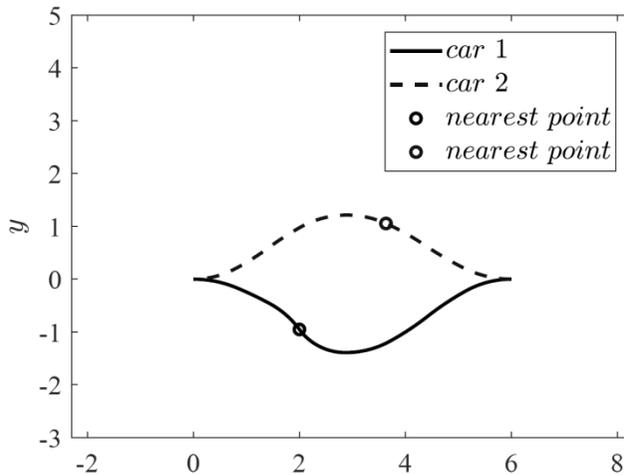


Рис. 6. Нечетко-оптимальные траектории движения роботизированных складских погрузчиков

Второй вариант рассмотренной задачи синхронного перемещения двух погрузчиков усложнен наличием ограничения на траекторию первого из них, которая не должна лежать ниже линии $y_1(t) = 0$. Еще одно дополнительное условие зададим в виде функции принадлежности $\mu_8(o)$ нечеткого множества допустимых значения ограничения o на траекторию первого погрузчика:

$$\mu_g(o) = \frac{1}{1 + e^{-3(o+2)^2}} ; o = \min_{t \in [0, t_1]} (y_1(t)).$$

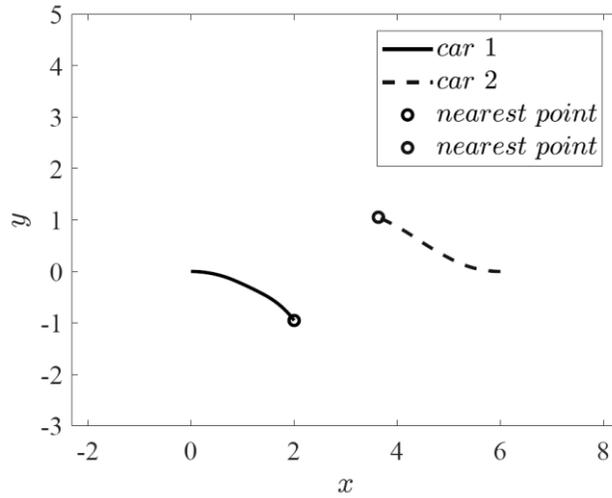


Рис. 7. Первая часть нечетко-оптимальных траекторий движения роботизированных складских погрузчиков

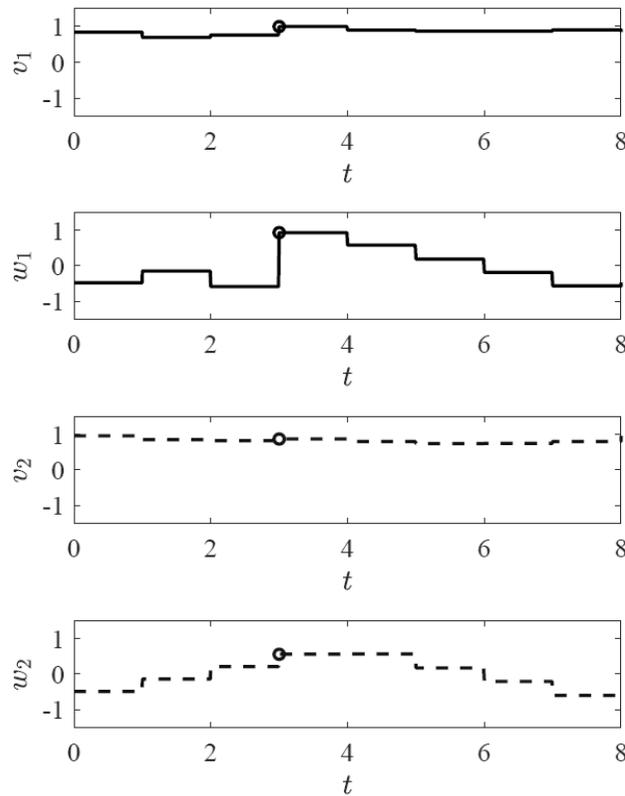


Рис. 8. Управляющие воздействия, реализующие нечетко-оптимальную траекторию движения складских погрузчиков

Характеристики найденного решения, включающего маршруты обоих погрузчиков и алгоритмы управления ими, иллюстрируются рис. 9–12, степень удовлетворения нечетким требованиям и ограничениям составляет 0,9975–0,9991.

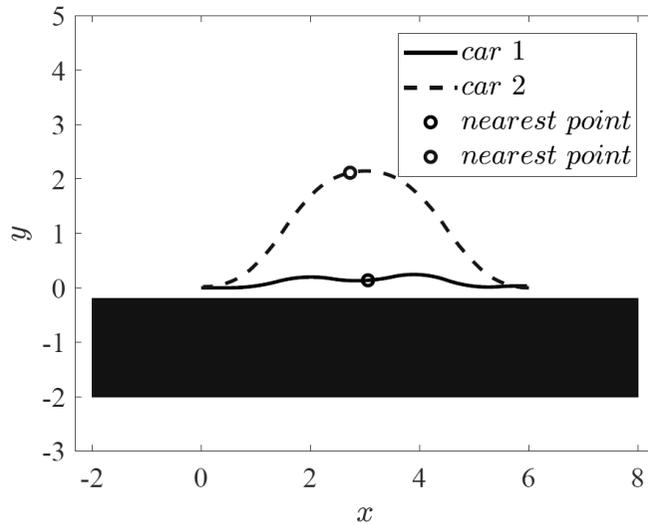


Рис. 9. Нечетко-оптимальные траектории движения роботизированных складских погрузчиков в условиях ограничения

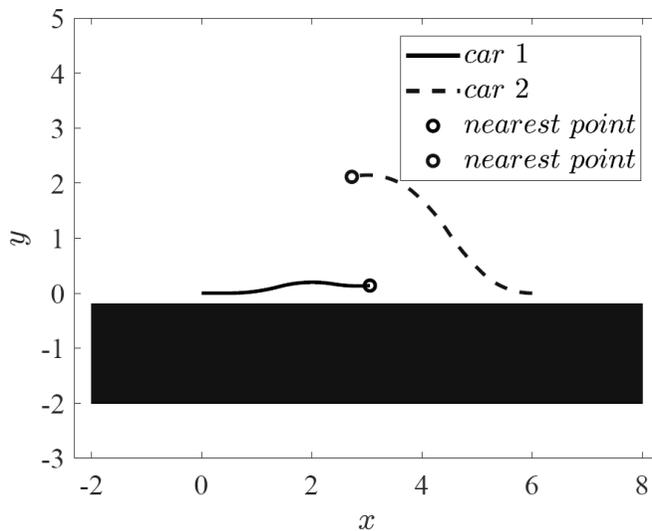


Рис. 10. Первая часть нечетко-оптимальных траекторий движения роботизированных складских погрузчиков в условиях ограничения

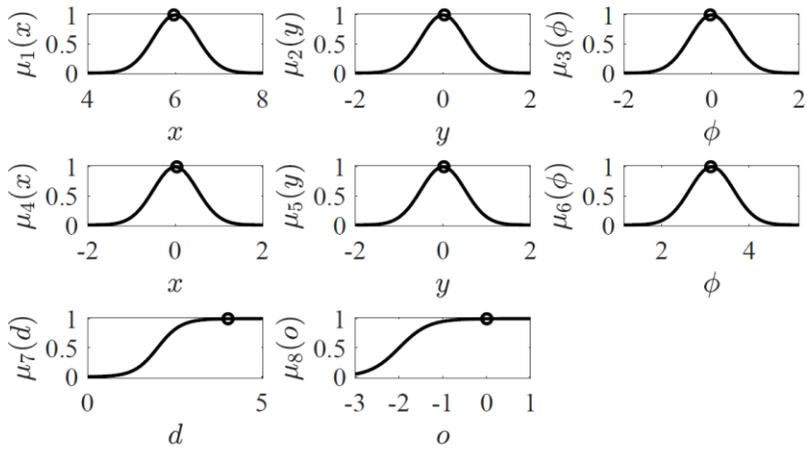


Рис. 11. Графики функций принадлежности $\mu_1 - \mu_8$ для нечетко-оптимальных траекторий движения роботизированных складских погрузчиков в условиях ограничения

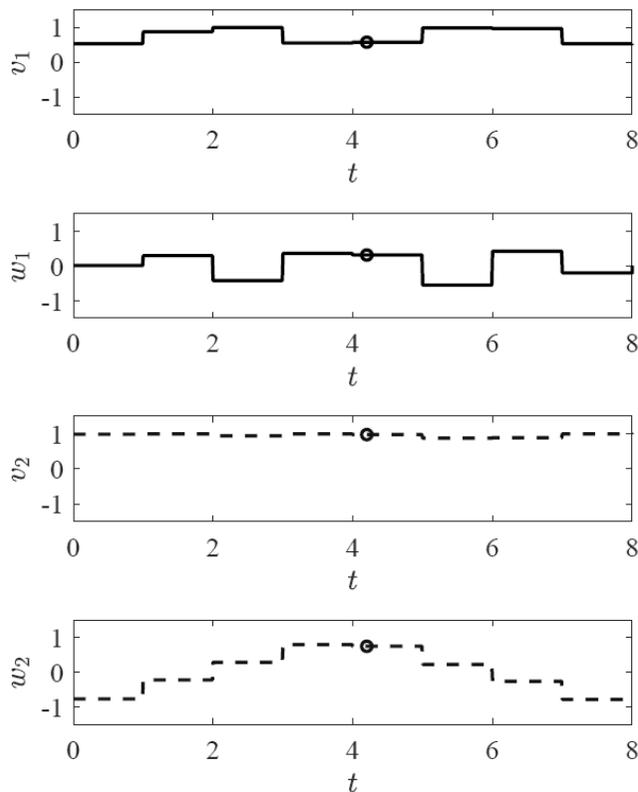


Рис. 12. Управляющие воздействия, реализующие нечетко-оптимальные траектории движения складских погрузчиков в условиях ограничения

Рассмотренные примеры свидетельствуют о возможности использования нечеткой логики в задачах синтеза систем управления с нечетко сформулированными целями и ограничениями.

Развитие метода, изложенного ранее в [13], состоит в постановке и решении задачи разработки вычислительных методов синтеза компьютерных систем управления многооперационным технологическим процессом взаимодействия группы роботизированных складских погрузчиков. Суть подхода состоит в представлении взаимодействующих управляющих подсистем в виде совокупности организованных на кластере цифровых регуляторов взаимосвязанных вычислительных процедур синтеза алгоритмов управления производственного (основанного на правилах) вида. Системы продукции априори не фиксируются и изменяются во времени, адаптируясь к условиям работы системы управления. Это позволяет определять структуру системы производственных правил и ее содержание. Такой подход представляется весьма перспективным, на его базе возможно автоматизировать весь процесс проектирования систем управления – от постановки задачи до моделирования их работы, включая проверку программного обеспечения, создавать технические устройства, самостоятельно генерирующие алгоритмы работы своих систем управления, и при необходимости модернизировать их.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рогачев Г.Н.* Использование гибридно-автоматного метода для описания систем автоматизации и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 12. – С. 14–19.
2. *Rogachev G.N.* Production method of describing automated controllers in the analysis of continuous-discrete control systems // Automatic Control and Computer Sciences. – 2014. – Vol. 48. – N 5. – pp. 249–256.
3. *Рогачев Г.Н.* Производственный метод описания, анализа и синтеза автоматических регуляторов непрерывно-дискретных систем управления // Cloud of Science. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 17–40.
4. *Campbell de Oliveira S., Naeem W., Irwin G.* A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres // Annual Reviews in Control. – 2012. – Vol. 36. – pp. 267–283.
5. *Nirmala G., Geetha S., Selvakumar S.* Mobile Robot Localization and Navigation in Artificial Intelligence: Survey // Computational Methods in Social Sciences. – 2016. – Vol. IV. – Issue 2. – pp. 12–22.
6. *Polvara R., Sharma S., Wan J., Manning A., Sutton R.* Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles // The Journal of Navigation. – 2018. – Vol. 71. – Issue 1. – pp. 241–25.
7. *Porta Garcia M.A., Montiel O., Castillo O., Sepulveda R., Melin P.* Path Planning for Autonomous Mobile Robot Navigation with Ant Colony Optimization and Fuzzy Cost Function Evaluation // Applied Soft Computing. – 2009. – V. 9. – N. 3. – pp. 1102–1110.
8. *Рогачев Г.Н.* Использование генетического алгоритма с отсечением по времени в задаче синтеза программного регулятора для машины Дубинса // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3 (32). – С. 27–32.
9. *Рогачев Г.Н.* Генетическое программирование в задачах поиска системотехнических решений // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – № 40. – С. 37–42.
10. *Беллман Р., Заде Л.* Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.
11. *Yager R.R., Zadeh L.A.* An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992. – 356 p.
12. *Carlsson C., Fullèr R., Giove S.* Optimization under fuzzy rule constraints // Belgian Journal of Operational Research, Statistics and Computer Sciences. – 1998. – Vol. 38 (2–3). – pp. 17–24.

13. *Рогачев Г.Н., Тянь П.В.* Нечеткие цели и ограничения в задаче управления транспортным средством // Устойчивость и процессы управления: Материалы III международной конференции. – СПб: Издательский дом Федоровой Г.В., 2015. – С. 545–546.

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

FUZZY OPTIMIZATION IN THE PROBLEMS OF FORKLIFT PATH PLANNING

G.N. Rogachev¹, N.G. Rogachev²

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

SSI Schäfer (Russia)
157, Galaktionovskaya st., Samara, 443001, Russian Federation
E-mail: rogachev8@mail.ru

Abstract. *The procedure of fuzzy optimization as the problem of robotic forklift path planning in the changing environment for a number of typical situations differing in the goals of the forklift functioning and the constraints imposed both on control resources and on the forklift behavior is considered. Simultaneously with the construction of forklift paths, the synthesis of algorithms for the work of digital controllers of forklift control systems as hybrid continuous-discrete systems is carried out. The procedure for constructing control systems with fuzzy goals and constraints is based on the representation of control algorithms in the form of a priori non-fixed and time-variable systems of rules*

Keywords: *robotized forklift, fuzzy optimization, hybrid discrete-continuous system, numerical procedure, system of rules.*

*Gennady N. Rogachev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Nikolay G. Rogachev, System Analytic.*