

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>

Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора

С. Г. Емельянов ¹, М. В. Бобырь ¹ ✉, Б. А. Бондаренко ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Представленное в данной статье исследование нацелено на повышение точности определения оттенка цвета. В качестве предмета исследования использовалась разработанная нечетко-логическая система распознавания цветов. Показателем эффективности выступал результат расчета процента площади чувствительности и RMSE разработанного метода.

Методы. Разработан и реализован метод распознавания цветовой метки на основе нечеткой логики, а именно с помощью нечеткого вывода Мамдани, состоящего из следующих этапов: фаззификация, нечеткий логический вывод, дефаззификация. В процессе фаззификации использовались треугольные функции принадлежности. В качестве композиционного правила использовались 12 входных переменных, объединенных на основе композиционного правила Заде в 27. На этапе дефаззификации использовался метод отношения площадей. Объектом исследования выступала разработанная математическая модель модифицированного метода отношения площадей и метода центра тяжести для определения цвета.

Результаты. Разработана математическая модель, состоящая из 4 шагов, которая гарантирует четкое определение 9 цветов и их оттенков. На основе оценки корня среднеквадратической ошибки сделан вывод, что предложенная модель лучше традиционных вариантов. Выражается тем, что разработанный метод реагирует на промежутке всей поверхности выходных переменных, в то время как традиционные методы имеют зоны нечувствительности к изменению входных переменных.

Заключение. Была разработана нечетко-логическая система распознавания цвета. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что показатели RMSE и чувствительности имеют лучшие результаты по отношению к другим системам.

Ключевые слова: нечеткая-логическая система; распознавание цвета; дефаззификатор; rgb; оттенок.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Емельянов С.Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А. Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 103-116. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>.

Поступила в редакцию 05.09.2022

Подписана в печать 16.09.2022

Опубликована 14.10.2022

© Емельянов С.Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А., 2022

Fuzzy-logic Color Recognition System Using a Fast Defuzzifier

Sergei G. Emelianov ¹, Maxim V. Bobyr ¹ ✉, Bogdan A. Bondarenko ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. The research presented in this article is aimed at improving the accuracy of determining the color shade. The developed fuzzy-logical color recognition system was used as the subject of the study. The efficiency indicator was the result of calculating the sensitivity area percentage and RMSE of the developed method.

Methods. A method based on fuzzy logic has been developed and implemented, namely, on the structure of Mamdani's fuzzy inference, which consists of the following stages: fuzzification, fuzzy logical inference, defuzzification. Triangular membership functions were used at the fuzzification stage. As a compositional rule, 12 input variables were used, combined on the basis of Zadeh's compositional rule in 27. At the defuzzification stage, the area ratio method was used. The object of the study was the developed mathematical model for determining color.

Results. A mathematical model has been developed, consisting of 4 steps, which guarantees a clear definition of 9 colors and their shades. Based on the estimation of the root of the mean square error, it was concluded that the proposed model is better than traditional options. It is expressed by the fact that the developed method reacts on the interval of the entire surface of output variables, while traditional methods have dead zones to changes in input variables.

Conclusion. A fuzzy-logical color recognition system was developed. In the course of experimental studies, it was found that the RMSE and sensitivity indicators have better results in relation to other systems.

Keywords: fuzzy-logic system; color recognition; defuzzifier; rgb; hue.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation. Emelianov S. G., Bobyr M. V., Bondarenko B. A. Fuzzy-logic Color Recognition System Using a Fast Defuzzifier. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 103-116 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-103-116>.

Received 05.09.2022

Accepted 16.09.2022

Published 14.10.2022

Введение

Нечеткие механизмы вывода применяются в ситуациях, когда невозможно принять решение в рамках классической логики. Такие системы просты и понятны. Они способны обеспечить наиболее эффективное решение сложных вопросов, легко модифицируемы, решают задачи с инженерными неопределенностями.

В работе [1] рассматривается алгоритм распознавания цветовых маркеров, блок-схема и псевдокод алгоритма. Предложен вариант системы распознавания цветовых маркеров на основе цифровой камеры. Проведено экспериментальное исследование системы на разных цифровых фильтрах. Представленные экспериментальные результаты [2-6] показывают, что алгоритм распо-

знавания цветowych маркеров позволяет с точностью до 95% распознавать маркеры при использовании гауссовского фильтра.

В статье [7] решение поставленной задачи достигается введением системы технического зрения, позволяющей на основе метода нечеткой кластеризации определять в режиме реального времени координаты центра цветовой метки. При моделировании нечеткой системы авторами были применены две модели дефаззификации: на основе метода центра тяжести и на основе отношения площадей [8-13].

В трудах [14-15] авторы рассматривают различные аспекты, позволяющие улучшить качество полученной карты глубины. В статье рассмотрено построение модернизированного фильтра Канни. Модернизация заключается в разработке новых правил и формул для определения принадлежности пикселя к границе в диапазоне направления угла градиента от 0 до 360 градусов. Полученные данные после обработки стереоизображения являются входной информацией для нечеткой иерархической математической модели построения карт глубины.

Авторами рассматривается задача уменьшения вычислительной сложности методов выделения контуров на изображениях [16]. Решение поставленной задачи достигается модификацией детектора Канни двумя нечетко-логическими методами, позволяющими сократить число проходов по исходному изобра-

жению. Интеллектуализация процесса детектирования границ осуществляется частичным повтором вычислительных операций, используемых в детекторе Канни, с дальнейшей заменой наиболее сложных вычислительных процедур.

В работе [17] рассматривается процесс формирования математической модели для метода дефаззификации результата в структуре нечеткого вывода [18-21]. Показаны этапы формирования результирующей формулы и даны пояснения по составляющим ее элементам. В заключении представлены временные результаты работы метода отношения площадей, запрограммированного на программируемой логической интегральной схеме.

В этих исследованиях для решения использовался метод центра тяжести. Общим недостатком данного метода является отсутствие аддитивности. Это снижает информационную составляющую нечеткого вывода.

В данной статье предложен метод распознавания цвета, основанный на нечетком выводе Мамдани, отличительной чертой которого является использование модифицированного метода отношения площадей на этапе дефаззификации.

Материалы и методы

Метод распознавания цвета, с помощью нечеткой MISO-системы реализован в виде следующей последовательности шагов.

где r – значение красного оттенка; g – значение зеленого оттенка; b – значение синего оттенка. Значения r , g , b соответствуют координатам RGB модели и варьируются от 0 до 255. Где $\max$ – наибольшее значение из r , g , b , $\min$ – наименьшее значение из r , g , b .

$$s = \begin{cases} 0, & \text{если } \max=0; \\ \frac{240 \times \left(\frac{255}{\max} - \frac{255}{\min} \right)}{1 - \left| 1 - \left(\frac{255}{\max} - \frac{255}{\min} \right) \right|}, & \\ \text{в любом другом случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Шаг 2. Формирование функций принадлежности. После получения данных с датчиков, а также их преобразования, получают два четких значения тона H и насыщенности S .

Значения распределяются с помощью треугольных функций для насыщенности (рис. 2) и тона (рис. 3).

Входные переменные нечеткой MISO-системы задаются треугольной функцией принадлежности выполняется по формуле:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a < x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{если } b < x < c; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

где x – входящий сигнал H или S поступающий от датчиков. Переменные a, b, c – вершины треугольной функции, которые подбираются в зависимости от требуемого вида треугольной функции принадлежности.

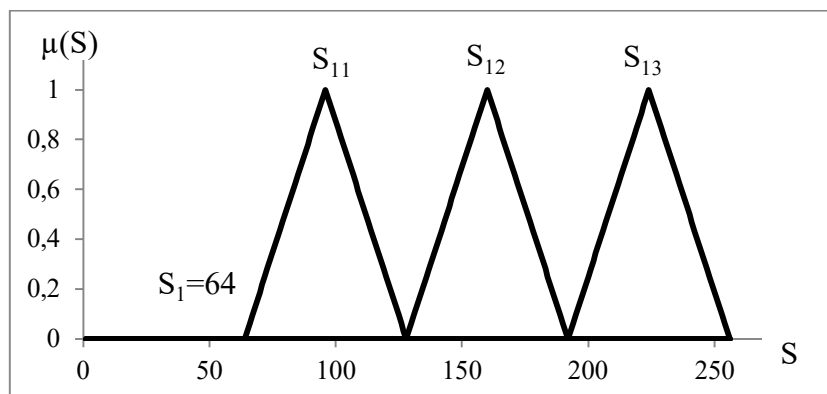


Рис. 2. Функция принадлежности насыщенности

Fig. 2. Saturation membership function

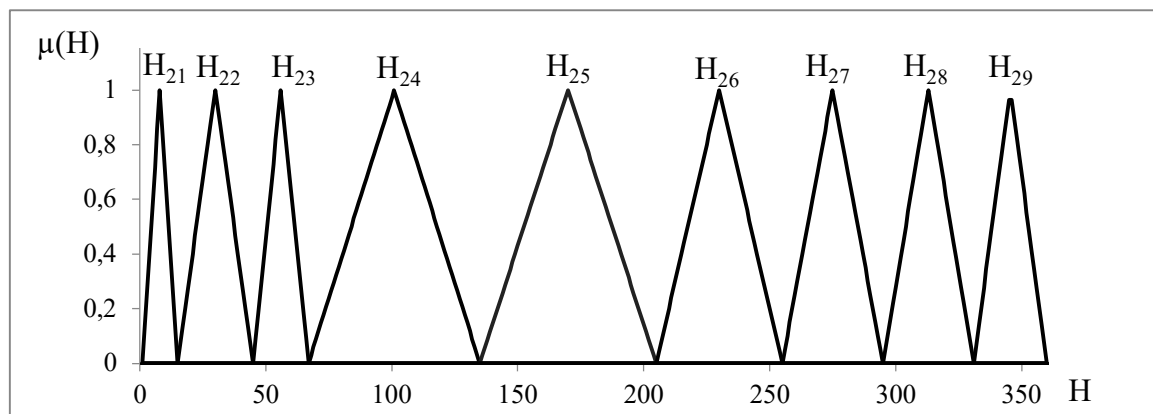


Рис. 3. Функция принадлежности цветового тона

Fig. 3. Hue membership function

Каждая из входных переменных насыщенности задается 3 функциями принадлежности, которые имеют метки, отображенные в табл. 1.

Входные переменные цветового тона задаются 9 функциями принадлеж-

ности, которые имеют метки, отображенные в табл. 2.

Для удобства определения цвета была взята цветовая схема и разделена на 27 секторов (рис.4) соответствующих функциям принадлежности – 3 уровня насыщенности и 9 уровней цветового тона.

Таблица 1. Метки функции принадлежности насыщенности

Table 1. Saturation membership function labels

Функции принадлежности насыщенности / Saturation membership functions		
S_{11}	S_{12}	S_{13}
(82;96;128)	(128;160;192)	(192;224;256)

Таблица 2. Метки функции принадлежности цветового тона

Table 2. Hue membership function labels

Функции принадлежности цветового тона / Color tone accessory functions		
H_{21}	H_{22}	H_{23}
(1;8;15)	(15;30;45)	(45;56;67)
H_{24}	H_{25}	H_{26}
(67;101;135)	(135;170;205)	(205;230;255)
H_{27}	H_{28}	H_{29}
(255;275;295)	(295;313;330)	(330;345;360)

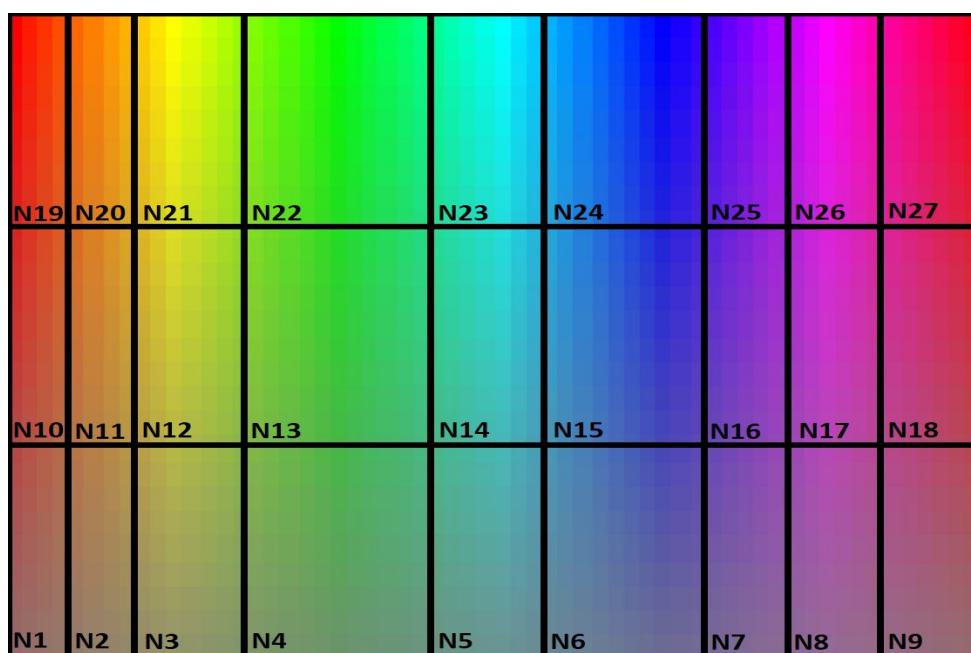


Рис. 4. Разделенная на сектора цветовая схема

Fig. 4. Sectorized color scheme

В итоге выделили 27 выходных переменных, соответствующих заданным секторам, и распределили их значения от 100 до 2700: $N_1(100)$; $N_2(200)$; $N_3(300)$; $N_4(400)$; $N_5(500)$; $N_6(600)$; $N_7(700)$; $N_8(800)$; $N_9(900)$; $N_{10}(1000)$; $N_{11}(1100)$; $N_{12}(1200)$; $N_{13}(1300)$; $N_{14}(1400)$; $N_{15}(1500)$; $N_{16}(1600)$; $N_{17}(1700)$; $N_{18}(1800)$; $N_{19}(1900)$; $N_{20}(2000)$; $N_{21}(2100)$; $N_{22}(2200)$; $N_{23}(2300)$; $N_{24}(2400)$; $N_{25}(2500)$; $N_{26}(2600)$; $N_{27}(2700)$.

Шаг 3. Формирование нечётких правил. Нечеткие правила задаются в виде:

$$\text{If } \mu(S_n) \text{ and } \mu(H_n), \text{ Then } N_n, \quad (4)$$

где $\mu(S_n)$ – значение функции насыщенности; $\mu(H_n)$, – значение функции цветового тона; N_n – значение соответствующие сектору на цветовой схеме.

Формируется база правил данной модели которая отображена в табл. 3. Модель насчитывает 27 правил, каждое из которых выдает уникальный результат.

Таблица 3. База правил нечетко-логической модели распознавания цвета

Table 3. The rule base of the fuzzy-logical model of color recognition

R ₁	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{21}$ » То « N_1 »	R ₁₀	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{21}$ » То « N_{10} »	R ₁₉	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{21}$ » То « N_{19} »
R ₂	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{22}$ » То « N_2 »	R ₁₁	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{22}$ » То « N_{11} »	R ₂₀	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{22}$ » То « N_{20} »
R ₃	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{23}$ » То « N_3 »	R ₁₂	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{23}$ » То « N_{12} »	R ₂₁	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{23}$ » То « N_{21} »
R ₄	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{24}$ » То « N_4 »	R ₁₃	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{24}$ » То « N_{13} »	R ₂₂	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{24}$ » То « N_{22} »
R ₅	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{25}$ » То « N_5 »	R ₁₄	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{25}$ » То « N_{14} »	R ₂₃	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{25}$ » То « N_{23} »
R ₆	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{26}$ » То « N_6 »	R ₁₅	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{26}$ » То « N_{15} »	R ₂₄	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{26}$ » То « N_{24} »
R ₇	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{27}$ » То « N_7 »	R ₁₆	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{27}$ » То « N_{16} »	R ₂₅	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{27}$ » То « N_{25} »
R ₈	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{28}$ » То « N_8 »	R ₁₇	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{28}$ » То « N_{17} »	R ₂₆	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{28}$ » То « N_{26} »
R ₉	Если « $\mu(S)=S_{11}$ и $\mu(H)=H_{29}$ » То « N_9 »	R ₁₈	Если « $\mu(S)=S_{12}$ и $\mu(H)=H_{29}$ » То « N_{18} »	R ₂₇	Если « $\mu(S)=S_{13}$ и $\mu(H)=H_{29}$ » То « N_{27} »

Далее выполняется композиционное правило вида:

$$M = \min(\mu(S_n); \mu(H_n)), \quad (5)$$

где $\mu(S_n)$ – значение первой входящей переменной; $\mu(H_n)$ – значение второй входящей переменной. Результирующая

М будет использоваться в следующем этапе получения четкого значения.

Шаг 4. Вычисление четкого значения.

На следующем этапе производится вычисление четких значений или дефазификация – получение четкой формы представления выходного значения (отклика) нечеткой системы. Существует большое количество методов дефазификации – в данном методе используется модифицированный метод отношения площадей:

$$\mu = \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \cdot (Y_{\max} - Y_i) \right] + Y_i, \quad (6)$$

где $\sum_{i=1}^n M_i$ – сумма результирующих значений нечетких правил; n – число нечетких правил; $Y_{\max}$ – максимальное значение выходной функции; Y_i – значение выходной функции определенное нечеткими правилами.

Результаты и их обсуждение

Для наглядного отображения результата работы данного метода дефазификации была построена поверх-

ность, которая отображает все возможные результаты определения цветов (рис. 5).

При вычислении цвета по формуле метода отношения площадей – значения выравниваются на пиках выходных переменных, из-за чего цвета перестают определяться друг от друга. Данный недостаток виден на рис. 6. Модифицированный метод (см. формулу (6)) исправляет данный недостаток, что видно на рис. 5.

При вычислении цветового оттенка по формуле метода центра тяжести проявляются зоны нечувствительности нечеткой системы для выходной переменной, из-за чего выходная переменная не определяется во всем имеющемся для нее диапазоне. Это также может спровоцировать ошибочный расчет на грацах цветов. Данный недостаток виден на рис. 7, поверхность по границам значений не выдает результирующих значений. Разработанный метод исправляет данный недостаток.

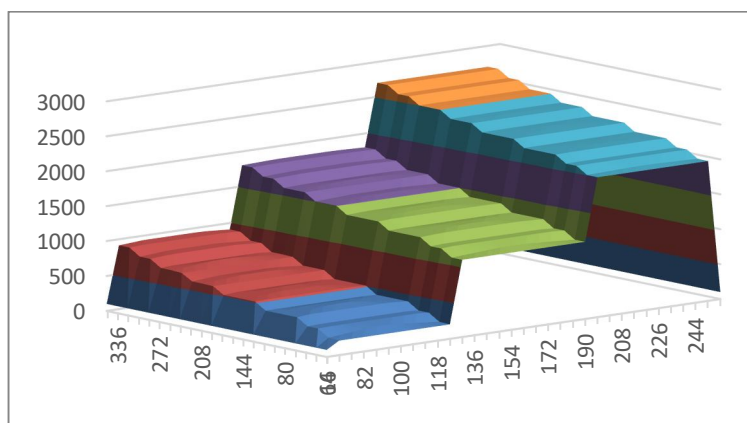


Рис. 5. Поверхность, построенная модифицированным методом отношения площадей

Fig. 5. Surface constructed by the modified area ratio method

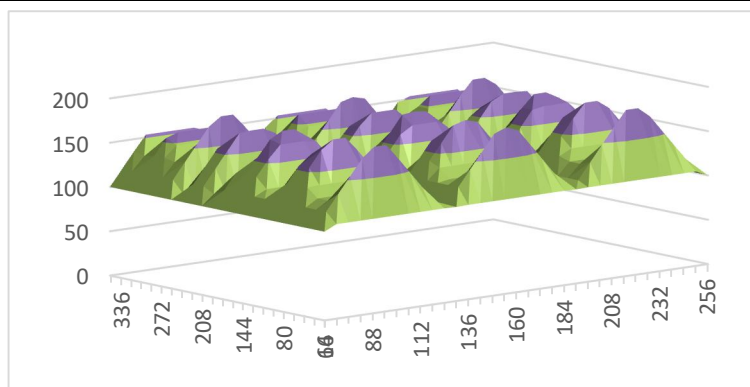


Рис. 6. Поверхность, построенная методом отношения площадей

Fig. 6. Surface constructed by the area ratio method

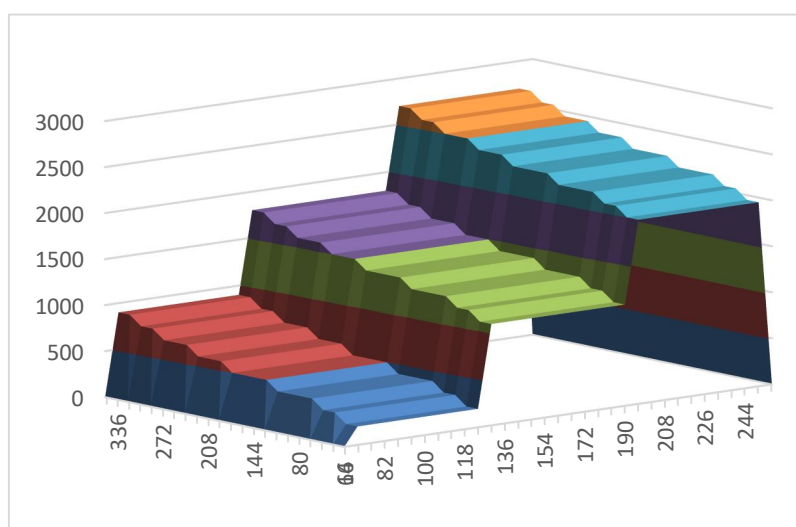


Рис. 7. Поверхность, построенная методом центра тяжести

Fig. 7. Surface constructed using the center of gravity method

Достоинства данного метода определяются возможностью четкого градуирования цветов по цветовой схеме, четкое определение цветового диапазона по схеме RGB и кластеризация по заданному диапазону, а также чувствительность системы ко всему диапазону спектра.

Недостаток данного метода заключается в необходимости расширения входящих значений и базы правил в том случае, если нам понадобится определять большее количество цветовых оттенков.

Также был рассчитан корень среднеквадратической ошибки (7) традиционных систем нечеткого вывода и разработанного модифицированного метода отношения площадей (см. формулу (6)). Результаты расчетов отображены в табл. 2.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y - y_{\text{этал}})^2}{N}}, \quad (7)$$

где $(y - y_{\text{этал}})$ – это разности между наблюдаемыми значениями и значениями, предсказанными изучаемой моделью; N – количество разностей.

Таблица 4. Результаты расчета корня среднеквадратической ошибки**Table 4.** Results of calculating the root of the mean square error

	Модификация метода отношения площадей / Modification of the area ratio method	Метод отношения площадей / Area ratio method	Метод центра тяжести / Center of Gravity method
Процент чувствительности системы	100%	100%	95%
RMSE	1.17	3.2	2.08

По результатам вычислений видно, что процент площади реагирующей поверхности выше. Такое явление происходит из-за нарушения принципа суперпозиции в традиционных методах.

Выводы

Разработаны и описаны нечетко-логическая система распознавания цвета, основанная на нечетком выводе Мамдани, отличительной чертой которого является использование модифицированного метода отношения площадей на этапе дефаззификации и ее математическая модель, состоящая из 4 шагов, которая гарантирует четкое определение 9 цветов и позволяет распознавать их оттенки.

Сделан вывод, что разработанный метод реагирует на промежутке всей поверхности выходящих переменных, в то время как традиционные методы имеют зоны нечувствительности к изменению входящих переменных. Метод центра тяжести реагирует на 5% хуже методов отношения площадей. Также у разработанного метода улучшена точность: почти в 2 раза по сравнению с методом центра тяжести и в 3 с традиционным методом отношения площадей.

Таким образом, экспериментально установлено, что предложенный метод распознавания цвета показал лучший результат по сравнению с традиционными системами нечеткого вывода.

Список литературы

1. Бобырь М.В., Белозеров А.П. Алгоритм распознавания цветовых маркеров // Промышленные АСУ и контроллеры. 2022; № 2: 30-35. DOI 10.25791/asu.2.2022.1348.
2. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // Measurement. 2020. Vol. 152, 107378, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.

3. Bobyr M.V., Emelianov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 88, 106030, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>.
4. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. Система лазерного контроля обработки деталей в реальном времени // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2005. № 11: 21-24.
5. Бобырь М.В., Титов В.С., Беломестная А.Л. Стабилизация теплового режима в процессе резания // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 6: 38-41.
6. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Якушев А.С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // *Информатика и автоматизация*. 2021. № 2 (20): 407-434.
7. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012; № 6: 21-26.
8. Bobyr' M.V., Titov V.S., Nasser A.A. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing // *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2015. 44: 633–641 <https://doi.org/10.3103/S1052618815070067>
9. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск: СФРУК, 2013. 153 с.
10. Гридин В.Н., Титов В.С., Труфанов М.И. Адаптивные системы технического зрения. М.: Наука, 2009.
11. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Математическая модель для нового метода Дефаззификации в структуре нечеткого вывода // *Мехатроника, автоматика и робототехника: сборник научных трудов международной научно-практической конференции*. Новокузнецк, 2018.; С.218-220.
12. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Дефаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2015; №9: 32– 41.
13. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification // *Fuzzy Sets Syst.* 1999; № 108: 159–178.
14. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канны. Часть 1 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, Ц. Цао // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2021; № 4: 12-20. DOI 10.25791/asu.4.2021.1271. EDN DQRLLK.
15. Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канны. Часть 2 / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, А. С. Якушев, С. Бхаттачарья // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2021; № 5: 3-15. DOI 10.25791/asu.5.2021.1277. EDN VOZBTI.
16. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ объектов / М. В. Бобырь, А. Е. Архипов, С. В. Горбачев [и др.] // *Информатика и автоматизация*. 2022; Т. 21. № 2: 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6. EDN YSFCPD.

17. Бобырь М.В., Кулабухов С.А. Математическая модель для нового метода Дефазификации в структуре нечеткого вывода // Мехатроника, автоматика и робототехника: сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2018. С. 218-220.

18. Vuong P. T., Madni A. M., Vuong J. B. VHDL implementation for a fuzzy logic controller. In 2006 World Automation Congress, WAC'06. IEEE Computer Society. 2006.

19. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. АСУ прогнозированием точности обработки деталей // Автоматизация в промышленности. 2008; № 4: 3-4.

20. Бобырь М. В., Милостная Н. А., Ноливос К. А. Комбинация нечетко-цифрового фильтра и ПИД регулятора в задаче управления термoelementом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022; Т. 23. № 9: 473-480. DOI 10.17587/mau.23.473-480. EDN RJUUSI.

21. Bobyr M. V. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA / M. V. Bobyr, A. S. Yakushev, A. A. Dorodnykh // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378. EDN DGESDX.

22. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

References

1. Bobyr M.V., Belozerov A.P. Algoritm raspoznavaniya tsvetovykh markerov [Algorithm for recognition of color markers]. *Promyshlennye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and Controllers*, 2022, no. 2, pp. 30-35. DOI 10.25791/asu.2.2022.1348.

2. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement*, 2020, vol. 152, 107378, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378>.

3. Bobyr M.V., Emelianov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, 106030, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.106030>.

4. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. Sistema lazernogo kontrolya obrabotki detalei v real'nom vremeni [System of laser control of parts processing in real time]. *Promyshlennye ASU i kontrolyery = Industrial ACS and Controllers*, 2005, no. 11, pp. 21-24.

5. Bobyr M.V., Titov V.S., Belomestnaya A.L. Stabilizatsiya teplovogo rezhima v protsesse rezaniya [Stabilization of thermal regime in the cutting process]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2010, no. 6, pp. 38-41.

6. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Yakushev A.S. Raspoznavanie ottenka tsvetovoi metki na osnove nechetkoi klasterizatsii [Color label hue recognition based on fuzzy clustering]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2021, no. 2 (20), pp. 407-434.

7. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Algoritm vysokoskorostnoi obrabotki detalei na osnove nechetkoi logiki [Algorithm for high-speed details processing based on fuzzy

logic]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2012, no. 6, pp. 21-26.

8. Bobyr M.V., Titov V.S., Nasser A.A. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2015; 44: 633–641. <https://doi.org/10.3103/S1052618815070067>

9. Uskov A.A. *Sistemy s nechetkimi modelyami ob"ektov upravleniya* [Systems with fuzzy models of control objects]. Smolensk, SFRUK Publ., 2013, 153 p.

10. Gridin V.N., Titov V.S., Trufanov M.I. *Adaptivnye sistemy tekhnicheskogo zreniya* [Adaptive vision systems]. Moscow, Nauka Publ., 2009.

11. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. [Mathematical model for the new Defuzzification method in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Mechatronics, automation and robotics. Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference]. Novokuznetsk, 2018, pp. 218-220 (In Russ.).

12. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. Defazzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei [Defuzzification of inference from the base of fuzzy rules based on the area difference method]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* = *Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 9, pp. 32–41.

13. Leekwijck W.V., Kerre E.E. Defuzzification: criteria and classification. *Fuzzy Sets Syst*, 1999, no. 108, pp.159–178.

14. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Tsao Ts. Postroenie karty glubiny s ispol'zovaniem modernizirovannogo fil'tra Kanni Chast' 1 [Depth Mapping Using the Modernized Canny Filter. Part 1]. *Promyshlennye ASU i kontroliery* = *Industrial ACS and Controllers*, 2021, no. 4, pp. 12-20. DOI 10.25791/asu.4.2021.1271. EDN DQRLK.

15. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S., Bhattacharya S. Postroenie karty glubiny s ispol'zovaniem modernizirovannogo fil'tra Kanni. Chast' 2 [Depth Mapping Using the Modernized Canny Filter. Part 2]. *Promyshlennye ASU i kontroliery* = *Industrial ACS and Controllers*, 2021, no. 5, pp. 3-15. DOI 10.25791/asu.5.2021.1277. EDN VOZBTI.

16. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Gorbachev S. V. [et al.] Nechetko-logicheskie metody v zadache detektirovaniya granits ob"ektov [Fuzzy-logical methods in the problem of detecting the boundaries of objects]. *Informatika i avtomatizatsiya* = *Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6. EDN YSFCPD.

17. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A. [Mathematical model for the new Defuzzification method in the structure of fuzzy inference]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Mechatronics, automation and robotics. Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference]. Novokuznetsk, 2018, pp. 218-220 (In Russ.).

18. Vuong P. T., Madni A. M., Vuong J. B. VHDL implementation for a fuzzy logic controller. In 2006 World Automation Congress, WAC'06. IEEE Computer Society. 2006.

19. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei [ACS for predicting the accuracy of processing parts]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2008, no. 4, pp. 3-4.

20. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Nolivos K. A. Kombinatsiya nechetko-tsifrovogo fil'tra i PID regul'yatora v zadache upravleniya termoelementom [Combination of fuzzy-digital filter and PID controller in the problem of thermoelement control]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2022, vol. 23, no. 9, pp. 473-480. DOI 10.17587/mau.23.473-480. EDN RJUISI.

21. Bobyr M. V., Yakushev A. S., Dorodnykh A. A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement*, 2020, vol. 152, pp. 107378. DOI 10.1016/j.measurement.2019.107378. EDN DGESDX.

22. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Moscow, BINOM. Knowledge Lab. Publ., 2013, 798 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Емельянов Сергей Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, ректор, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rector@swsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>, Researcher ID: E-3511-2013

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Maxim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Computer Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>, Researcher ID: G-2604-2013

Бондаренко Богдан Андреевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sikersinko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5415-9015>, Researcher ID: HGV-0751-2022

Bogdan A. Bondarenko, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sikersinko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5415-9015>, Researcher ID: HGV-0751-2022