

## Система технического зрения в задаче определения расстояний от видеокамеры до объекта

М.В. Бобырь<sup>1</sup> ✉, С.Г. Емельянов<sup>1</sup>, Н.А. Милостная<sup>1</sup>

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

✉ e-mail: maxbobyry@gmail.com

### Резюме

**Цель исследования.** Разработка вычислительного процесса в системе технического зрения, позволяющего определять расстояние до объектов от одной видеокамеры на основе трансформации RGB данных, полученных от КМОП-видеокамеры, в трехмерные координаты, показывающие расположение объекта на 3d сцене.

**Методы.** Научная статья посвящена методам определения расстояний от видеокамеры до объектов, имеющих важное значение в области компьютерного зрения и когнитивного моделирования. Исследование охватывает разнообразные подходы, используемые для оценки расстояний с помощью видеоаналитики, традиционных моделей анализа изображений и машинного обучения. Рассматривается метод, основанный на классическом алгоритме детектирования маркеров, включающий новейший подход, реализующий принцип нейро-нечеткого обучения в системе технического зрения. Особое внимание уделяется визуальной оценке эффективности и точности предложенного нейро-нечеткого подхода при оценке передвижений исполнительных механизмов мехатронного комплекса. Это исследование предоставляет обзор современного состояния методов определения расстояний от видеокамеры до объектов и предложения по дальнейшему улучшению и развитию данной области.

**Результаты.** Предложенная в данном исследовании методология определения расстояний от системы технического зрения до объектов представляет собой значимый шаг в развитии методов позиционирования приводов мехатронных комплексов. Методология была апробирована в реальных условиях и продемонстрировала значительное улучшение точности позиционирования приводов. В ходе вычислительных экспериментов удалось в режиме реального времени определять трехмерные координаты (центр масс) детектируемых объектов. Это привело к улучшению позиционирования приводов мехатронного комплекса на 12% по сравнению с аналогичными решениями, что важно для достижения требуемых показателей производительности и эффективности производственной системы.

**Заключение.** Точность разработанной методологии была проверена на различных тестовых наборах данных, включая сценарии с различными условиями освещения, измененным фоном и распознаванием различных типов объектов. Результаты экспериментов подтвердили эффективность предложенной методики и её применимость в реальных условиях, обеспечивая улучшение точности позиционирования приводов мехатронного комплекса.

**Ключевые слова:** система технического зрения; триангуляция; стереозрение; нечеткая логика; детектирование объектов.

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

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-21-00071 – «Разработка модели компьютерного зрения для интеллектуальной навигации робототехнических систем, основанной на построении трехмерных сцен по картам глубин».

**Для цитирования:** Бобырь М.В., Емельянов С.Г., Милостная Н.А. Система технического зрения в задаче определения расстояний от видеокамеры до объекта // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 34-51. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-34-51>.

Поступила в редакцию 19.09.2023

Подписана в печать 09.10.2023

Опубликована 28.10.2023

## Vision System in the Task of Determining Distances from the Video Camera to the Object

Maksim V. Bobyr <sup>1</sup> ✉, Sergey G. Emelyanov <sup>1</sup>, Natalia A. Milostnaya <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: maxbobyr@gmail.com

### Abstract

**Purpose of research.** Development of a computational process in a vision system to determine the distance to objects from a single video camera based on the transformation of RGB data received from a CMOS video camera into three-dimensional coordinates showing the location of the object on the 3d scene.

**Methods.** The research paper focuses on methods for determining distances from a video camera to objects of significant importance in the field of computer vision and machine learning. The study covers a variety of approaches used for distance estimation using video analytics, traditional image analysis models and machine learning. A method based on the classical marker detection algorithm incorporating a recent approach that realizes the principle of neuro-fuzzy learning in a vision system is considered. Special attention is paid to the visual evaluation of the effectiveness and accuracy of the proposed neuro-fuzzy approach in estimating the movements of actuators of mechatronic complex. This study provides an overview of the current state of the art of methods for determining distances from a video camera to objects and suggestions for further improvement and development of this field.

**Results.** The methodology for determining distances from the vision system to objects proposed in this study represents a significant step in the development of methods for positioning actuators of mechatronic complexes. The methodology was tested in real conditions and demonstrated a significant improvement in the accuracy of actuator positioning. During computational experiments it was possible to determine in real time the three-dimensional coordinates (center of mass) of the detected objects. This led to a 12% improvement in the positioning of mechatronic drives compared to similar solutions, which is important for achieving the required performance and efficiency of the production system.

**Conclusion.** The accuracy of the developed methodology was tested on various test datasets, including scenarios with different lighting conditions, changed background and recognition of different types of objects. Experimental results confirmed the effectiveness of the proposed methodology and its applicability in real-world conditions, providing improved positioning accuracy of the mechatronic system actuators.

**Keywords:** *vision system; triangulation; stereo vision; fuzzy logic; object detection.*

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

**Funding.** *The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 23-21-00071 "Development of a computer vision model for intelligent navigation of robotic systems based on the construction of three-dimensional scenes based on depth maps".*

**For citation:** Bobyr M. V., Emelyanov S. G., Milostnaya N. A. Vision System in the Task of Determining Distances from the Video Camera to the Object. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 34-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-34-51>.

Received 19.09.2023

Accepted 09.10.2023

Published 28.10.2023

\*\*\*

## Введение

Системы технического зрения (СТЗ) играют ключевую роль в области компьютерного зрения и автоматизации технологических процессов и производств, предоставляя важные данные, например, о местоположении объектов, их форме и различных других характеристиках. В последние годы значительное внимание уделяется разработке и совершенствованию методов определения расстояний от камеры до объектов [1]. Это имеет стратегическое значение во многих областях, таких как робототехника, автономные транспортные средства, промышленное производство, медицинская техника и многое другое.

Определение расстояний до объектов является ключевым компонентом для решения задачи позиционирования и оценки глубины в 3д сценах реальной среды. С течением времени методы определения расстояний значительно эволюционировали, благодаря применению различных методов, включая анализ изображений, стереозрение, ла-

зерное сканирование, использование инфракрасного и ультразвукового спектра, а также новейших моделей глубокого обучения [2].

Анализ классических методов определения расстояний от системы технического зрения до детектируемых объектов представляет собой важную часть исследования в области компьютерного зрения. Эти методы включают в себя различные техники и подходы, которые применяются для оценки глубины 3д сцены и расстояния до объектов. Проанализируем наиболее распространенные классические методы детектирования объектов и проведем их краткий анализ (рис. 1, табл. 1).

Триангуляция (Triangulation). Данный метод использует угловую информацию для расчета расстояний до объектов. Два известных угла (или направления) на видеокамеру позволяют определить треугольник между камерой и объектом, используя вышеуказанную геометрию [3, 4, 5].

Метод определения времени пролета (Time-of-Flight). В данном методе

измеряется время, которое необходимо для того, чтобы световой инфракрасный сигнал отразился от детектируемого объекта и вернулся к видеокамере. Измеренное время пропорционально расстоянию до объекта [6, 7]. Данный ме-

тод является глобальным методом и использует специализированную модель освещения (амбиентный свет – ambient light), в которой значение яркости каждой точки объекта зависит от других объектов 3d сцены.



**Рис. 1.** Классификация методов определения расстояний до детектируемых объектов

**Fig. 1.** Classification of methods for determining distances to detected objects

Разновидностями метода определения времени пролета являются следующие модели: инфракрасное зрение (Infrared Imaging) [8, 9, 10], лазерное сканирование (Laser Scanning) [11, 12] и ультразвуковое зрение (Ultrasonic Imaging) [13, 14].

В процессе инфракрасного зрения измеряется излучение, излучаемое объектами. При лазерном сканировании и ультразвуковом зрении определения времени, которое требуется лазерному или ультразвуковому сигналу, чтобы дойти и отразиться от детектируемой поверхности. На основе этого времени так же, как и в предыдущих моделях, рассчитывается расстояние до объекта.

**Стереозрение (Stereovision).** В данном методе используются две и более видеокамер с известным расстоянием

между ними для создания параллельных изображений сцены. Путем сравнения соответствующих точек на этих изображениях после построения карты глубин рассчитываются расстояния до объектов [15, 16, 17].

**Метод маркеров (Marker-based)** использует различные маркеры (например, QR-коды, цветовые метки) на объектах для определения расстояний. Путем анализа размеров и положения маркеров на изображении рассчитываются центр масс распознанных объектов, а затем с помощью специализированных алгоритмов вычисляются расстояния до объектов [18, 19].

Каждый из этих классических методов имеет свои преимущества и ограничения (табл. 1), и выбор метода зави-

сит от конкретных потребностей приложения и условий сцены. Однако с развитием современных технологий, таких как глубокое обучение или нейро-нечеткое моделирование появляются новые под-

ходы, которые дополняют или улучшают классические методы определения расстояний до объектов, повышая точность путём комбинирования вышеуказанных подходов.

**Таблица 1.** Анализ преимуществ и недостатков моделей определения расстояний до объектов

**Table 1.** Analysis of the advantages and disadvantages of models for determining distances to objects

| Метод / Method        | Преимущества / Advantages                                                 | Недостатки / Disadvantages                                                                              |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Триангуляция          | Применим к различным типам видеокамер и объектов                          | Точность зависит от угловой информации и стабильности измерений                                         |
| Времени пролета       | Быстрое измерение, широкий диапазон расстояний, высокая точность          | Ограниченные углы обзора, ограниченная разрешающая способность                                          |
| Инфракрасное зрение   | Хорошо работает при низкой видимости и в различных условиях освещения     | Диапазон измерений ограничен                                                                            |
| Лазерное сканирование | Высокая точность                                                          | Требует прямой видимости объекта, не большие углы обзора                                                |
| Ультразвуковое зрение | Хорошо работает в условиях низкой видимости                               | Ограниченная дальность измерений, подвержен влиянию помех                                               |
| Стереозрение          | Точные результаты, высокая разрешающая способность                        | Требует точной калибровки видеокамер, ограничен углами обзора, не достаточно точен при низком освещении |
| Метод маркеров        | Высокая точность измерений, не высокая сложность вычислительного процесса | Требуется наличие маркеров на объектах, ограничен углами обзора                                         |

Цель данного исследования заключается в обзоре и анализе современных методов определения расстояний от видеокамеры до объектов, а также в разработке нового подхода, позволяющего улучшить

точность позиционирования приводов мехатронного комплекса. Предложенная методология призвана расширить функциональные возможности существующих систем технического зрения, обеспечивая

более точное позиционирование объектов в пространстве и способствуя развитию передовых технологий в области компьютерного зрения.

## Материалы и методы

Работа системы технического зрения основана на обнаружении неподвижных и/или движущихся объектов в реальном времени, распознавании и анализе свойств найденных объектов на изображении. В зависимости от полученных данных СТЗ должны передавать результаты детектирования объектов на исполнительные механизмы мехатронных комплексов.

Для обработки видеоинформации СТЗ оснащаются соответствующими алгоритмами и специализированным программным обеспечением, причем данные приложения должны адаптироваться к изменению условий любого технологического процесса путем изменения структуры программного кода<sup>1</sup>.

Процедура полученных данных из реальной среды в системе технического зрения состоит из следующих действий. Свет, отраженный детектируемым объектом, проходит через три оптических фильтра основных цветов (R-красный, G-зеленый, B-синий) (рис. 2а). Затем свет, поступивший на фотодиоды, преобразуется в электрический сигнал и затем в сумматоре объединяются в один сигнал

(рис. 2б). После этой процедуры создается цветное изображение, где каждый пиксель представлен тройкой значений ( $R \in [0..255]$ ,  $G \in [0..255]$ ,  $B \in [0..255]$ ), соответствует уровням яркости каждого из основной составляющей цвета модели RGB.

Далее к полученному изображению возможно применить классические методы компьютерной обработки изображений:

1. Фильтрация изображения используется для удаления шумов на текстурах изображения. Могут включать использование статистических моделей и алгоритмы генерации текстур изображений [1].

2. Изменение контрастности изображения используется для увеличения разницы между яркостью соседних пикселей, делая объекты более видными. Примеры методов изменения контрастности на изображении включают следующие алгоритмы: линейное растяжение гистограммы и эквализация гистограммы [20, 21].

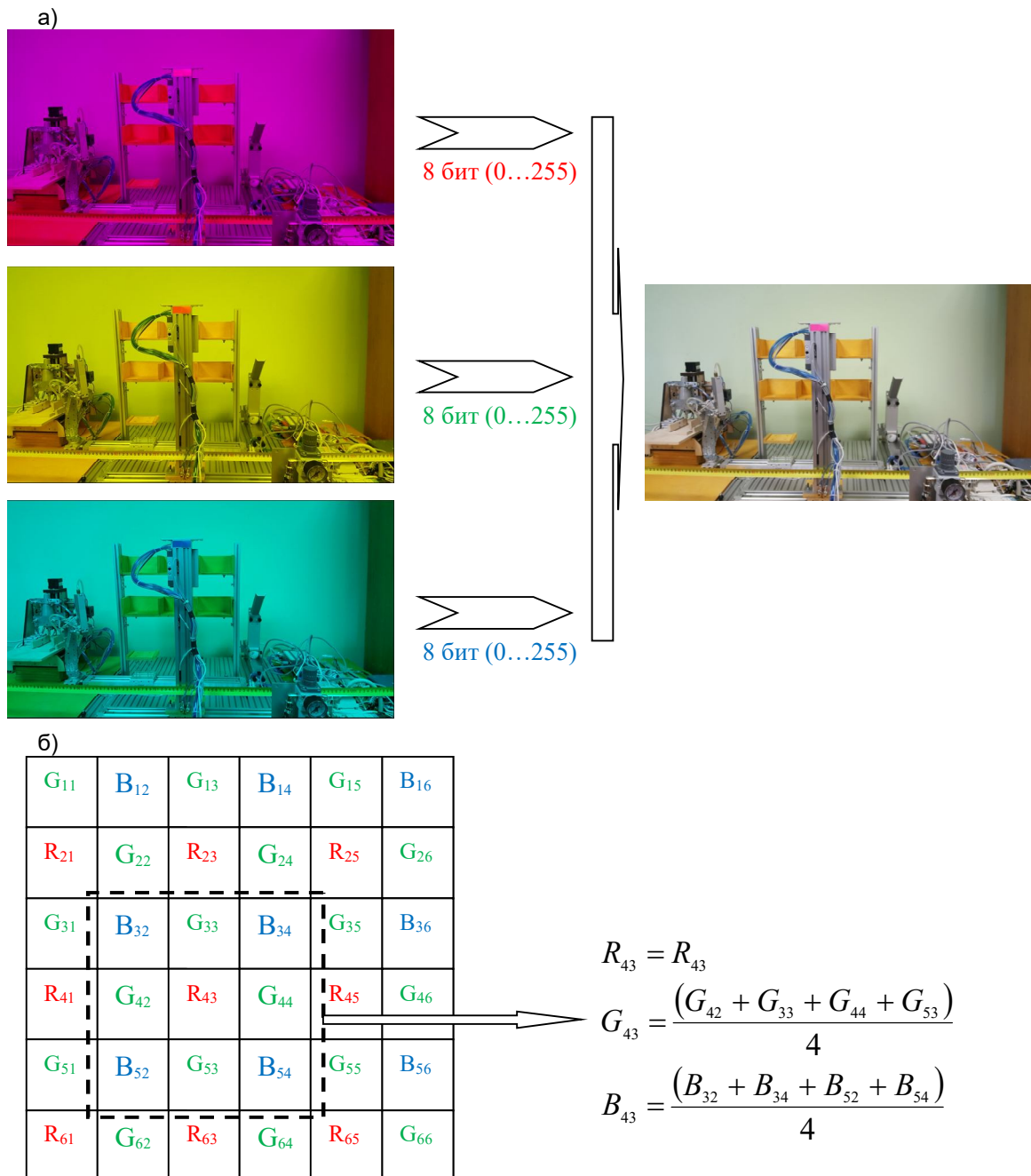
3. Выделение объектов на изображении, позволяет выделять объекты на изображении и отделять их от фона. Обычно включает использование методов пороговой обработки изображения и алгоритмов кластеризации [22, 23].

4. Распознавание образов используется для автоматического определения объектов на изображении и их классификации. Эта процедура может включать использование нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения [24, 25].

<sup>1</sup> Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечетких систем технического зрения: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

5. Сегментация изображений предназначена для разделения изображения на несколько регионов схожей формы или цвета. Примеры методов сегмента-

ции изображений включают использование алгоритма графовых разрезов и метода активных контуров [26, 27].



**Рис. 2.** Процесс построения RGB-изображения: **а** – трансформация 8-битных каналов по каждой составляющей цвета (красной, синей и зеленой); **б** – вычисление градаций цвета на RGB-изображении

**Fig. 2.** RGB image construction process: **a** – transformation of 8-bit channels for each color component (red, blue and green); **b** – calculation of color gradations on RGB image

6. Оптический поток позволяет определять скорость и направление движения объектов на видео. Примеры методов оптического потока включают алгоритмы Лукаса-Канаде и алгоритмы Хорна-Шунка [28, 29].

7. Синтез текстуры используется для генерации новых текстур на основе имеющихся изображений. Примеры методов синтеза текстуры включают использование статистических моделей и алгоритмов глубокого обучения нейронных сетей [30, 31].

С учетом вышесказанного была разработана методология синтеза СТЗ с использованием одной видеокамеры, состоящей из следующих этапов.

1. Получение и преобразование RGB изображения в цветовую модель HSV:

$$H = \begin{cases} \text{undefined}, & \text{if } \text{MAX} = \text{MIN}; \\ 60 \times \frac{G - B}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 0^\circ, & \text{if } \text{MAX} = R \text{ and } G \geq B; \\ 60 \times \frac{G - B}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 360^\circ, & \text{if } \text{MAX} = R \text{ and } G < B; \\ 60 \times \frac{B - R}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 120^\circ, & \text{if } \text{MAX} = G; \\ 60 \times \frac{R - G}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 240^\circ, & \text{if } \text{MAX} = B; \end{cases}$$

$$S = \frac{\text{MAX} - \text{MIN}}{1 - \left| 1 - \left( \frac{\text{MAX} + \text{MIN}}{S_f} \right) \right|},$$

где R, G, B – значения яркости цветов в модели RGB; MAX, MIN – экстремумы яркостей цветов;  $S_f$  – коэффициент нормализации; H – тон; S – насыщенность.

2. Расчет степеней принадлежности входных переменных: тон и насыщенность:

$$\mu_{x_i}(x_{ij}) = \text{trimf}(x_{ij}; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq a; \\ \frac{x_{ij} - a}{b - a}, & a \leq x_{ij} \leq b; \\ \frac{c - x_{ij}}{c - b}, & b \leq x_{ij} \leq c; \\ 0, & c \leq x_{ij}. \end{cases}$$

3. Создание базы нечетких знаний:

Fuzzy Rule: If (S) Low And (H) Negative, Then Cluster (N) equal  $N_1$ .

4. Расчет номера кластера, соответствующего цветовой метке:

$$Cr_v = \left\lfloor \frac{\sum_{i=1}^{27} \alpha_i}{n} (N_{27} - N_{\text{active}}) \right\rfloor + N_{\text{active}}.$$

5. Бинаризация распознанной цветовой меткой:

$$I_B = \begin{cases} 1, & \text{if } Cr_v = N_{26} \parallel Cr_v = N_{17} \parallel \\ & \parallel Cr_v = N_8 (\text{color}) \\ 0, & \text{else} \end{cases}.$$

6. Фильтрация бинаризованного изображения:

$$I_F = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{l=1}^3 \sum_{p=1}^3 I_{Bl,p} \cdot \frac{\text{MAX} + 1}{k} \cdot m_{l,p} \geq T \\ 0, & \text{else} \end{cases}.$$

7. Определение центра масс детектируемого объекта:

$$\text{if } I_F = 1 \text{ then } X = \frac{\sum_{i=1}^w l_i}{\text{count}},$$

$$\text{if } I_F = 1 \text{ then } Y = \frac{\sum_{j=1}^h l_j}{\text{count}}.$$

8. Вычисление смещения центра масс детектируемого объекта по координатам XY:

$$\text{DIST}_x = \frac{(X_i - X_{i-1}) \cdot w_{\text{real}}}{w},$$

$$\text{DIST}_y = \frac{(Y_i - Y_{i-1}) \cdot h_{\text{real}}}{h},$$

9. Вычисление площади распознанной цветовой метки:

$$S = (x_2 - x_1) \times (y_2 - y_1).$$

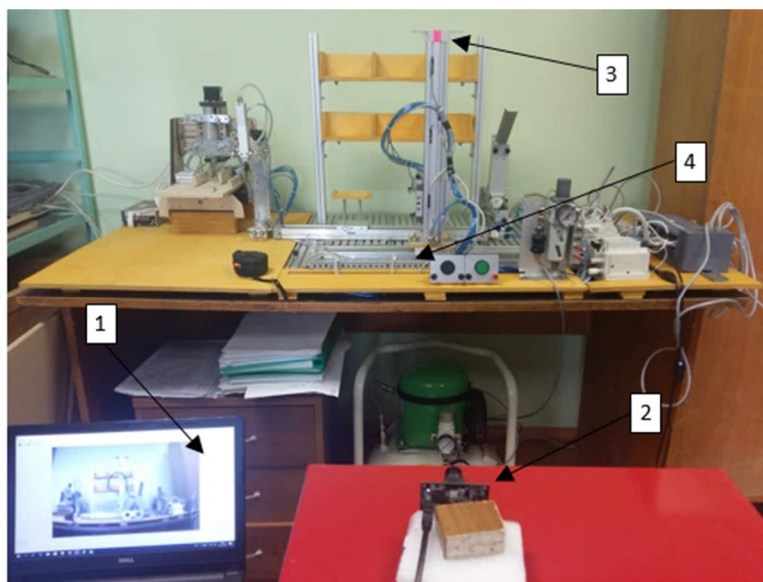
10. Расчёт расстояния от видеокамеры до цветовой метки по Z координате:

$$\text{Distance} = 1299,84 \times S^{-0,46}.$$

Последовательное выполнение десяти этапов представленной методологии позволяет определять расстояние от видеокамеры до детектируемого объекта. Следует отметить, что предложенная методология основана на нейро-нечетком подходе [32, 33]

## Результаты и их обсуждение

Предложенная методология вычисления расстояния от видеокамеры СТЗ до детектируемого объекта реализована на математической модели распознавания цветовой метки и была применена на практике в интеллектуальном пневматическом мехатронном комплексе [34]. В этом мехатронном комплексе (рис. 3) на управляемых пневматических приводах устанавливается прямоугольная розовая метка 2×4 см. Для регистрации положения исполнительных механизмов перед комплексом установлена видеокамера Pixy CMUcam5. Полученное изображение передается на компьютер, где в режиме реального времени осуществляется распознавание цветовой метки и определение ее положения в кадре для начального и последующего положений цилиндра.

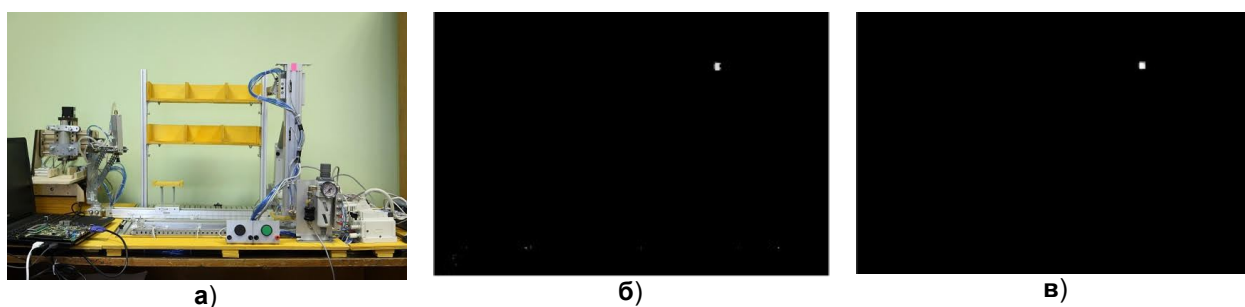


**Рис. 3.** Мехатронный комплекс с разработанной системой технического зрения: 1 – ПК; 2 – Pixy CMUcam5; 3 – цветовой маркер; 4 – управляемый пневматический привод

**Fig. 3.** Mechatronic complex with a developed technical vision system: 1 – PC; 2 – Pixy CMUcam5; 3 – color marker; 4 – controlled pneumatic actuator

В ходе проведения эксперимента отслеживалось перемещение пневмопривода с установленной на нем цветовой меткой. Регистрация показателей проводилась на расстояниях 10, 20, 30 и 35 сантиметров. В это время координаты центра масс цветовой метки, как по горизонтальному (ось абсцисс), так и вертикальному (ось ординат) направле-

ниям были вычислены с использованием 7 этапа предложенной методологии. Расстояние, на которое перемещался пневмопривод вдоль оси ХУ в составе мехатронного комплекса, вычислялось на 8 этапе методологии, а перемещение пневматического захвата вдоль оси аппликат (Z-координата) рассчитывалось на 10 этапе.



**Рис. 4.** Детектирование цветовой метки: **а** – начальное положение; **б** – бинаризация (этап 5); **в** – фильтрация (этап 6)

**Fig. 4.** Detecting a color mark: **a** – initial position; **b** – binarization (stage 5); **v** – filtration (stage 6)

Для анализа экспериментальных данных вычисляли два точностных показателя: MAPE (средняя абсолютная ошибка

в процентах) и точность по формуле Accuracy:  $\text{Accuracy} = 1 - \text{MAPE}$  (табл. 2)<sup>1</sup>.

**Таблица 2.** Экспериментальное исследование системы технического зрения

**Table 2.** Experimental study of a technical vision system

| Длина, см                | 10     | 20                  | 30     | 35     |
|--------------------------|--------|---------------------|--------|--------|
| Минимальное, см          | 9,77   | 19,85               | 29,96  | 34,99  |
| Максимальное, см         | 10,03  | 20,07               | 30,08  | 35,15  |
| MAPE                     | 0,0053 | 0,0032              | 0,0011 | 0,0024 |
| Accuracy, %              | 99,47  | 99,68               | 99,89  | 99,76  |
|                          |        | Средняя точность, % |        |        |
| СТЗ                      |        | 99,7                |        |        |
| Chaki, J. etc [35]       |        | 86                  |        |        |
| Boukezzoula, R. etc [36] |        | 85                  |        |        |

<sup>1</sup> Милостная Н. А. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейронечетких систем технического зрения: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2023. 350 с.

Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что ошибка распознавания детектируемых объектов не превышает 0,3%. При этом точность метода распознавания цветowych меток на 12% превышает точность аналогов. Дальнейшим развитием направления работы планируется разработка рекомендаций для распараллеливания вычислительных процессов в представленной методологии [37].

## Выводы

В научной статье представлена новая методология синтеза системы технического зрения, основанной на нейро-нечетком подходе и предназначенной для расчета расстояния до обнаруживаемых объектов. Кроме того, в статье проведен анализ уже существующих

методов определения расстояний до распознанных объектов.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что точность предложенной методологии превышает точность аналогичных методов на 12%. Это свидетельствует о том, что предложенный нейро-нечеткий подход является более эффективным и перспективным в контексте решения задачи определения расстояний с использованием систем технического зрения. Полученные результаты в статье открывают новые горизонты для исследований и разработок в области компьютерного зрения и его применения в разнообразных сферах, таких как автоматизация технологических процессов и производств, робототехника и управление автономными роботизированными системами.

## Список литературы

1. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А. Новейшие методы обработки изображений. М.: Физико-математическая литература, 2008. 496 с. ISBN 978-5-9221-0841-6.
2. Прикладные нейро-нечеткие вычислительные системы и устройства / М. В. Бобырь, С. Г. Емельянов, А. Е. Архипов, Н. А. Милостная. М.: Издательский Дом "Инфра-М", 2023. 263 с. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-017976-6. DOI 10.12737/1900641.
3. Быстрый алгоритм расшифровки изображения объекта в структурированном свете для измерения трёхмерного профиля в условиях нелинейности оптического тракта / С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. А. Павлов, В. Г. Меледин // Измерительная техника. 2023. № 8. С. 36-41. DOI 10.32446/0368-1025it.2023-8-36-41.
4. Quantifying interfacial interactions for improved membrane antifouling: A novel approach using triangulation and surface element integration method / X. You, L. Shen, Y. Zhao, D. Ling Zhao, J. Teng, H. Lin, ... M. Zhang // Journal of Colloid and Interface Science. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.117>
5. Пешхоев А. А. Эффективность применения метода триангуляции с использованием Beacon маячков для определения местоположения внутри помещений // Вестник науки. 2019. Т. 4, № 5(14). С. 527-529.

6. Chen M., Bärwolff G., Schwandt H. Time-of-flight technology applied in pedestrian movement detection // In Transportation Research Procedia. 2014. Vol. 2. P. 189–194. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.028>
7. Klempt W. Review of particle identification by time of flight techniques // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1999. Vol. 433. № 1-2. P. 542-553. DOI 10.1016/S0168-9002(99)00323-X.
8. Зарипова А. Д., Зарипов Д. К., Усачев А. Е. Визуализация дефектов высоковольтных изоляторов на инфракрасных изображениях с помощью методов компьютерного зрения // Научная визуализация. 2019. Т. 11, № 2. С. 88-98. DOI 10.26583/sv.11.2.07.
9. Гераськин Д. П. Количественная оценка эффективности инфракрасной системы технического зрения медицинского работника тепловизионной диагностики // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2000. № 2. С. 93-96.
10. Объективное определение остроты зрения у пациентов с поражением макулярной области с помощью инфракрасной видеонистагмографии / Е. П. Поручикова, З. И. Мамедов, И. А. Лоскутов, О. Л. Поручикова // Эффективная фармакотерапия. 2022. Т. 18, № 45. С. 6-13. DOI 10.33978/2307-3586-2022-18-45-6-12.
11. Смирнов Д. А., Тер-Саакян А. С., Делендик А. М. Алгоритм начальной выставки управляемых летательных аппаратов с помощью бортовой системы технического зрения и наземного лазерного маяка // Авиационные системы в XXI веке: тезисы докладов юбилейной Всероссийской научно-технической конференции. М.: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2022. С. 139-140.
12. Елистратов В. В. Об использовании лазерных устройств технического зрения на автомобильной технике // Аспирант и соискатель. 2007. № 3(40). С. 126.
13. Борисов Е. Г. Комбинированная телевизионно - ультразвуковая система технического зрения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2011. № 1. С. 91-99.
14. Данишевский О. В., Парфенов А. В., Станкевич В. В. Современные решения робототехнического зрения универсальной кибернетической платформы // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 5. С. 32-38.
15. Аврашков П. П., Коськин Н. А., Константинов И. С. Оценка эффективности различных моделей конвертации изображений в стереоформат с помощью карт глубины // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 12. С. 165-168.
16. Bobyr M., Arkhipov A., Emelyanov S., Milostnaya N. A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model // Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>

17. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Милостная Н. А. Метод расчета карты глубин на основе мягких операторов // Системы и средства информатики. 2019. Т. 29, вып. 2. С. 71–84. <https://doi.org/10.14357/08696527190207>
18. Бобырь М. В., Архипов А. Е., Якушев А. С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации // Информатика и автоматизация. 2021. № 20(2). С. 407-434.
19. Нечётко-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. С. 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6.
20. Растяжение гистограммы // CoderLessons. 2022. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/akademicheskii/tsifrovaia-obrabotka-izobrazhenii/rastiazhenie-gistogrammy>.
21. Эквализация гистограмм // LightHouse Software. 2022. URL: <https://lhs-blog.info/programming/dlang/ekvalizacziya-gistogramm/>.
22. Обработка изображения // NDT-testing. 2022. URL: <https://ndt-testing.ru/porogovaja-obrabotka-izobrazhenij.html>.
23. Простейшая кластеризация изображений методом к-средних // Habr. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/165087/>.
24. Распознавание образов с помощью искусственного интеллекта // Habr. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/709432/> (Дата обращения 25.01.2023).
25. Киселева Т. В., Маслова Е. В., Бычков А. Г. Машинное обучение для решения задач распознавания образов // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2021. № 2(18). С. 19-24. doi: 10.47501/itnou.2021.2.19-24
26. Белим С. В., Ларионов С. Б. Сегментация изображений на основе алгоритма выделения сообществ на графе // Математические структуры и моделирование. 2016. № 3(39). С. 74-85.
27. Сорокин Д. В., Крылов А. С. Метод активных контуров для сегментации изображений. М.: МАКС Пресс, 2022. 16с.
28. Вычисление оптического потока методом Лукаса-Канаде // Habr. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/169055/>.
29. Чигринский В. В., Матвеев И. А. Исследование движения структуры радужной оболочки глаза методом оптического потока // Математические методы распознавания образов. 2017. Т. 18. № 1. С. 108-109.
30. Белоконь А. В., Проскурин А. В., Фаворская М. Н. Классификация методов синтеза текстур // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1. № 7. С. 350-351.
31. Синтез изображений с помощью глубоких нейросетей // Компьютерные науки. 2023. URL: [https://youtu.be/\\_rfmEzb6YP4](https://youtu.be/_rfmEzb6YP4).

32. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio // *Applied Soft Computing*. 2022. Vol. 117. P. 108449. DOI 10.1016/j.asoc.2022.108449.

33. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 88. P. 106030. DOI 10.1016/j.asoc.2019.106030.

34. Бобырь М.В., Дородных А.А., Якушев А.С. Устройство и программная модель управления пневматическим мехатронным комплексом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018;19(9):612-617. <https://doi.org/10.17587/mau.19.612-617>

35. Fragmented plant leaf recognition: Bag-of-features, fuzzy-color and edge-texture histogram descriptors with multi-layer perceptron / J. Chaki, N. Dey, L. Moraru, F. Shi // *Optik*. 2019. № 181. Pp. 639–650. doi:10.1016/j.ijleo.2018.12.107

36. Boukezzoula R., Coquin D., Nguyen T. L., Perrin S. Multi-sensor information fusion: Combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot // *Robotics and Autonomous Systems*. 2018. № 100. Pp. 302–316. Doi:10.1016/j.robot.2017.12.002

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

## References

1. Potapov A. A., Gulyaev Yu. V., Nikitov S. A. *Noveishie metody obrabotki izobrazhenii* [Newest methods of image processing]. Moscow, Fiziko-matematicheskaya literatura, 2008. 496 p. ISBN 978-5-9221-0841-6.

2. Bobyr M. V., Emel'yanov S. G., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. *Prikladnye neuro-nechetkie vychislitel'nye sistemy i ustroystva* [Applied neuro-fuzzy computing systems and devices]. Moscow, Infra-M Publ., 2023, 263 p. ISBN 978-5-16-017976-6. DOI 10.12737/1900641.

3. Dvoinishnikov S. V., Bakakin G. V., Pavlov V. A., Meledin V. G. Bystryi algoritm rasshifrovki izobrazheniya ob"ekta v strukturirovannom svete dlya izmereniya trekhmernogo profilya v usloviyakh nelineinosti opticheskogo trakta [Fast algorithm for deciphering an object image in structured light for measuring a three-dimensional profile in conditions of non-linearity of the optical path]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*, 2023, no. 8, pp. 36-41. DOI 10.32446/0368-1025it.2023-8-36-41.

4. You X., Shen L., Zhao Y., Ling Zhao D., Teng J., Lin H., ... Zhang M. Quantifying interfacial interactions for improved membrane antifouling: A novel approach using triangulation and surface element integration method. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.117>.

5. Peshkhoev A. A. Effektivnost' primeneniya metoda triangulyatsii s ispol'zovaniem Beacon mayachkov dlya opredeleniya mestopolozheniya vnutri pomeshchenii [Efficiency of using the triangulation method using Beacon beacons for determining location indoors]. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*, 2019, vol. 4, no. 5(14), pp. 527-529.

6. Chen M., Bärwolff G., & Schwandt H. Time-of-flight technology applied in pedestrian movement detection. In *Transportation Research Procedia*, 2014, vol. 2, pp. 189–194. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.028>

7. Klempt W. Review of particle identification by time of flight techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999, vol. 433, no. 1-2, pp. 542-553. DOI 10.1016/S0168-9002(99)00323-X.

8. Zaripova A. D., Zaripov D. K., Usachev A. E. Vizualizatsiya defektov vysokovol'tnykh izolyatorov na infrakrasnykh izobrazheniyakh s pomoshch'yu metodov komp'yuternogo zreniya [Visualization of defects in high-voltage insulators on infrared images using computer vision methods]. *Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 88-98. DOI 10.26583/sv.11.2.07.

9. Geraskin D. P. Kolichestvennaya otsenka effektivnosti infrakrasnoi sistemy tekhnicheskogo zreniya meditsinskogo rabotnika teplovizionnoi diagnostiki [Quantitative assessment of the effectiveness of the infrared technical vision system of a medical worker for thermal imaging diagnostics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Proceedings of Higher Educational institutions. Electromechanics*, 2000, no. 2, pp. 93-96.

10. Poruchikova E. P., Mamedov Z. I., Loskutov I. A., Poruchikova O. L. Ob"ektivnoe opredelenie ostroty zreniya u patsientov s porazheniem makulyarnoi oblasti s pomoshch'yu infrakrasnoi videonistagmografii [Objective determination of visual acuity in patients with damage to the macular area using infrared videonystagmography]. *Effektivnaya farmakoterapiya = Effective Pharmacotherapy*, 2022, vol. 18, no. 45, pp. 6-13. DOI 10.33978/2307-3586-2022-18-45-6-12.

11. Smirnov D. A., Ter-Sahakyan A. S., Delendik A. M. [Algorithm for the initial exhibition of controlled aircraft using an on-board technical vision system and a ground-based laser beacon]. *Aviatsionnye sistemy v XXI veke: Tezisy dokladov yubileinoi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Aviation systems in the XXI century. Reports of scientific and technical conference]. Moscow, State Research Institute of Aviation Systems Publ., 2022, pp. 139-140 (In Russ.).

12. Elistratov V.V. Ob ispol'zovanii lazernykh ustroystv tekhnicheskogo zreniya na avtomobil'noi tekhnike [On the use of laser technical vision devices on automotive vehicles]. *Aspirant i soiskatel' = Graduate Student and Applicant*, 2007, no. 3(40), 126 p.

13. Borisov E. G. Kombinirovannaya televizionno - ul'trazvukovaya sistema tekhnicheskogo zreniya [Combined television - ultrasonic technical vision system]. *Voprosy radi-*

oelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Issues of Radio Electronics. Series: Television technology, 2011, no. 1, pp. 91-99.

14. Danishevsky O. V., Parfenov A. V., Stankevich V. V. Sovremennye resheniya robototekhnicheskogo zreniya universal'noi kiberneticheskoi platformy [Modern solutions of robotic vision of a universal cybernetic platform]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of Radio Electronics*, 2019, no. 5, pp. 32-38.

15. Avrashkov P. P., Koskin N. A., Konstantinov I. S. Otsenka effektivnosti razlichnykh modelei konvertatsii izobrazhenii v stereoformat s pomoshch'yu kart glubiny [Evaluating the effectiveness of various models for converting images into stereo format using depth maps]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2020, no. 12, pp. 165-168.

16. Bobyr M., Arkhipov A., Emelyanov S., Milostnaya N. A method for creating a depth map based on a three-level fuzzy model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 117. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105629>

17. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Milostnaya N. A. Metod rascheta karty glubin na osnove myagkikh operatorov [Method for calculating depth maps based on soft operators]. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and Informatics Tools*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 71-84. <https://doi.org/10.14357/08696527190207>.

18. Bobyr M. V., Arkhipov A. E., Yakushev A. S. Raspoznavanie ottenka tsvetovoi metki na osnove nechetkoi klasterizatsii [Recognition of the shade of a color mark based on fuzzy clustering]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2021, no 20(2), pp. 407-434.

19. 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 object boundaries]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 376-404. DOI 10.15622/ia.21.2.6.

20. *Rastyazhenie gistogrammy* [Histogram stretching]. CoderLessons: [website]. 2022. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/akademicheskii/tsifrovaia-obrabotka-izobrazhenii/rastiazhenie-gistogrammy>.

21. *Ekvalizatsiya gistogramm* [Histogram equalization]. LightHouse Software: [website]. 2022. URL: <https://lhs-blog.info/programming/dlang/ekvalizatsiya-gistogramm/>.

22. *Obrabotka izobrazheniya* [Image processing]. NDT-testing: [website]. 2022. URL: <https://ndt-testing.ru/porogovaja-obrabotka-izobrazhenij.html>.

23. Prosteishaya klasterizatsiya izobrazhenii metodom k-srednikh [The simplest image clustering using the k-means method]. *Habr*. 2022. URL: <https://habr.com/ru/articles/165087/>.

24. Raspoznavanie obrazov s pomoshch'yu iskusstvennogo intellekta [Pattern recognition using artificial intelligence]. *Habr*. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/709432/> (Access date: 25.01.2023).

25. Kiseleva T.V., Maslova E.V., Bychkov A.G. Mashinnoe obuchenie dlya resheniya zadach raspoznavaniya obrazov [Machine learning for solving pattern recognition problems]. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* = *ITNOU: Information technologies in science, education and management*, 2021, no. 2(18), pp. 19-24. doi: 10.47501/itnou.2021.2.19-24
26. Belim S. V., Larionov S. B. Segmentatsiya izobrazhenii na osnove algoritma vydeleniya soobshchestv na grafe [Image segmentation based on an algorithm for identifying communities on a graph]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie* = *Mathematical Structures and Modeling*, 2016, no. 3(39), pp. 74-85.
27. Sorokin D. V., Krylov A. S. *Metod aktivnykh konturov dlya segmentatsii izobrazhenii* [Method of active contours for image segmentation]. Moscow, MAX Press Publ., 2022, 16 p. ISBN 978-5-317-06761-8.
28. Vychislenie opticheskogo potoka metodom Lukasa-Kanade [Calculation of optical flow by the Lucas-Kanade method]. Habr. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/169055/>.
29. Chigrinsky V.V., Matveev I.A. Issledovanie dvizheniya struktury raduzhnoi obolochki glaza metodom opticheskogo potoka [Study of the movement of the structure of the iris of the eye using the optical flow method]. *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov* = *Mathematical Methods of Pattern Recognition*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 108-109.
30. Belokon A.V., Proskurin A.V., Favorskaya M.N. Klassifikatsiya metodov sinteza tekstur [Classification of texture synthesis methods]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* = *Current Problems of Aviation and Astronautics*, 2011, vol. 1, no. 7, pp.
31. Sintez izobrazhenii s pomoshch'yu glubokikh neirosetei [Image synthesis using deep neural networks]. *Komp'yuternye nauki* = *Computer Science*. 2023. URL: [https://youtu.be/\\_rfmEzb6YP4](https://youtu.be/_rfmEzb6YP4).
32. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A. The fuzzy filter based on the method of areas' ratio. *Applied Soft Computing*, 2022, vol. 117, 108449 p. DOI 10.1016/j.asoc.2022.108449.
33. Bobyr M. V., Emelyanov S. G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, 106030 p. DOI 10.1016/j.asoc.2019.106030.
34. Bobyr M.V., Dorodnykh A.A., Yakushev A.S. Ustroistvo i programmnaya model' upravleniya pnevmaticheskim mekhatronnym kompleksom [Device and software model for controlling a pneumatic mechatronic complex]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2018, no. 19(9), pp. 612-617. <https://doi.org/10.17587/mau.19.612-617>.
35. Chaki J., Dey N., Moraru L., Shi F. Fragmented plant leaf recognition: Bag-of-features, fuzzy-color and edge-texture histogram descriptors with multi-layer perceptron. *Optik*, 2019, no. 181, pp. 639–650. DOI:10.1016/j.ijleo.2018.12.107

36. Boukezzoula R., Coquin D., Nguyen T. L., Perrin S. Multi-sensor information fusion: Combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, no. 100, pp. 302–316. Doi:10.1016/j.robot.2017.12.002

37. 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.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**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), 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

**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

**Милостная Наталья Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat\_mil@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

**Natalya A. Milostnaya**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat\_mil@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-9165>