

На правах рукописи

Якушев Алексей Сергеевич

Модель, метод и устройство построения карты глубин стереоизображения на основе иерархической нечёткой системы

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск-2022

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре вычислительной техники

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бобырь Максим Владимирович

Официальные оппоненты: **Мещеряков Роман Валерьевич**
доктор технических наук, профессор РАН,
Институт проблем управления им. В.А.
Трапезникова Российской академии наук,
главный научный сотрудник лаборатории
№ 80 «Киберфизических систем» (г. Москва)

Бажанов Александр Геральдович
кандидат технических наук, доцент,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г.
Шухова, доцент кафедры технической
кибернетики (г. Белгород)

Ведущая организация: **Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр Российской
академии наук, г. Санкт-Петербург**

Защита диссертации состоится «18» марта 2022 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.02, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, по адресу: 305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте https://swsu.ru/upload/iblock/c5e/5obd07gasym9zss14poavo0rwm57e7iq/Dissertatsiya-YAkushev-A_S.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Титенко Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Актуальным научным и практическим направлением развития отрасли приборостроения электронно-вычислительных средств и систем управления является разработка моделей, методов и специализированных устройств, обеспечивающих построение карты глубин стереоизображения, под которой понимается расчёт значений диспаратета, получаемых путём последовательности операций обработки двух фото или видео изображений.

В настоящее время для построения карты глубин стереоизображения используют следующие методы: анализа стереопары, расчёта значения диспаратета нейронными сетями или аппаратом нечёткой логики. К устройствам для формирования данных карт относят: камеры структурированного света, камеры, измеряющие задержку отраженного света, пленоптические камеры или камеры светового поля, устройства на основе технологии LIDAR.

Для формирования карты глубин стереоизображения используются различные алгоритмы, наибольшее распространение получили: полуглобальное соответствие (SGMA – Semi-global matching algorithm) и суммы абсолютных разностей (SAD – Sum of absolute differences). Данные алгоритмы обладают рядом недостатков. В первом алгоритме карта глубин стереоизображения получается за несколько проходов при которых необходимо дважды определить значения диспаратета, что увеличивает число вычислительных операций и уменьшает его производительность. Во втором алгоритме из-за неодинаковости степени освещённости пикселей на двух изображениях стереопары, ухудшается точность формирования карты глубин стереоизображения. Для преодоления этих недостатков применяют алгоритмы построения карты глубин стереоизображения, дополняемые такими операциями как: размытие и выделение контуров объектов, объединение границ и др.

Описанные недостатки формируют необходимость повышения точности построения карты глубин стереоизображения, которая оценивается показателями: корень из среднеквадратической ошибки (RMSE – Root mean square error), стремится к минимальному значению и пиковое отношение сигнал/шум (PSNR – Peak signal-to-noise ratio), стремится к максимальному значению.

Степень разработанности проблемы. Исследованием методик построения карты глубин и выделения контуров объектов занимались как российские, так и зарубежные учёные: Матюнин С.Б., Ватолин Д.С., Козлов В.Л., Фисенко В.Т., Дюдин М.В., Ляшева С.А., Павлидис Т., Девятков В.В., Галкин В.А., Аксенов А.Ю., Косовская Т. М., Pileun K., Jingdao C. и др. Изучением и разработкой карт глубин с применением нечёткой логики занимались такие учёные, как Perez-Patricio M., Abiel A., Arias-Estrada M., Takeshi R., Taro K., Sugeno M. и др. В основе большинства работ данных авторов лежит алгоритм SAD. Кроме нечётко-логических систем для построения карты глубин применяют нейронные сети, рассмотренные в работах следующих авторов: Гапон Н.В., Семенищев Е.А., Жданова М.М., Сизякин Р.А., Воронин В.В. и др. В нейронных сетях используется процесс обучения сети, что приводит к увеличению количества вычислительных операций в её структуре и снижает производительность системы в целом. Нечёткий вывод не использует в своей структуре процесс обучения и это позволяет повысить производительность построения карты глубин стереоизображения. В случае использования аппарата нечёткой логики исследователи разрабатывают одноуровневые нечёткие системы. Это ограничивает их функционал при решении задач обработки видео или фото информации в связи со сложностью операций

преобразования, анализа и обработки. Данные операции проблематично описать одноуровневой нечёткой системой из-за переизбытка входных и выходных переменных, что ведёт к «проклятию размерности».

Изложенное выше указывает на актуальность поставленной научно-технической задачи разработки модели, метода и устройства построения карты глубин стереоизображения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках грантов Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МД-2893.2015.8 (исполнитель проекта), № МД-707.2017.8 (исполнитель проекта) и в Госзадании № 2.1396.2017/4.6 (исполнитель проекта), а также программы «Умник» № 15249ГУ/2020 (руководитель проекта).

Цель диссертационной работы – повышение точности построения карты глубин стереоизображения на основе оценки пикового отношения сигнал/шум и корня из среднеквадратической ошибки.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **основные задачи**:

1. Анализ существующих моделей, методов и устройств построения карты глубин стереоизображения с целью обоснования выбранного направления исследования.
2. Разработка обобщённой математической модели иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения и модификация фильтра Канни с целью улучшения точности формирования карты глубин и распознавания границ объектов на стереоизображениях.
3. Формирование метода построения карты глубин стереоизображения на основе обобщённой математической модели иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения.
4. Создание структурно-функциональной организации и устройства на основе метода построения карты глубин стереоизображения.

Объект исследования: устройство построения карты глубин стереоизображения.

Предмет исследования: вычислительные процессы в устройстве построения карты глубин стереоизображения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теория нечёткой логики и множеств, методы математического моделирования, вычислительной математики и статистики, системы искусственного интеллекта и машинного обучения, основы теории построения алгоритмов, теории распознавания образов и обработки изображений, методы построения интеллектуальных устройств для систем обработки видеоданных, а также теория проектирования вычислительных устройств и ЭВМ.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщённая математическая модель иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения, включающая математические модели предварительной подготовки изображений, выделения контуров модифицированным фильтром Канни и иерархическую нечёткую систему, отличающаяся тем, что при распознавании границ рассматривается угол направления градиента в диапазоне от 0° до 360° и обладающая свойством аддитивности при дефазификации чёткого значения диспаритета на выходе второго уровня иерархии нечёткой системы.

2. Метод построения карты глубин стереоизображения, отличающийся последовательностью вычислительных операций, включающих преобразования цветных изображений в градации серого и их размытие, выделение контуров модифицированным фильтром Канни, удаление концевых точек и объединение разрывов границ и вывода

значения диспаритета карты глубин стереоизображения с помощью иерархической нечёткой системы, позволяющий повысить коэффициент пикового отношения сигнал/шум, во время операции удаления концевых точек.

3. Структурно-функциональная организация и устройство построения карты глубин стереоизображения, отличающиеся иерархической схемой вычислительного процесса расчёта диспаритета, позволяющие за счёт обеспечения свойства полноты нечёткой базы правил повысить точность построения карты глубин стереоизображения в 1,5 раза, оцениваемую коэффициентом корень из среднеквадратической ошибки.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработан способ формирования иерархической нечёткой системы (пат. РФ № 2676114, пат. РФ № 2709125), реализующий процесс построения нечётко-логических систем, и быстродействующий дефазификатор (Пат. РФ № 2670826), уменьшающий время обработки информации на выходе нечёткой системы в 1,2 раза.

2. Реализована программа для ЭВМ «Программа для графической обработки изображений» №2020667278, выполняющая операции предварительной подготовки видеоизображений для последующего построения карты глубин стереоизображения, улучшающая значение пикового отношения сигнал/шум (PSNR) в 1,33 раза.

3. Создано программное решение для определения смещения объектов на изображениях, отраженное в свидетельствах о государственной регистрации программ ЭВМ: «Программа расчёта расстояния перемещения объектов на двумерных изображениях» № 2020664468 и «Программа расчёта расстояния перемещения объектов на основе распознавания цветовой метки» № 2020665538, позволяющие повысить точность построения карты глубин стереоизображения в 1,5 раза за счёт использования быстродействующего дефазификатора, основанного на методе отношения площадей.

4. Выполнена программная реализация математической иерархической нечёткой системы, представленная в свидетельствах для государственной регистрации программ ЭВМ («Программа обучения для дефазификации на основе метода разности площадей» № 2016612747, «Программа автоматизированной адаптации функций принадлежности для проведения нечётко-логического вывода» № 2016615425, «Программа нечётко-логического вывода разными методами дефазификации и проведения их сравнительного анализа» № 2016615804), позволяющая сократить число операций в структуре нечёткого вывода более чем в 1,1 раза.

Реализация результатов работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО «НПО Кабельные сети» и ООО «Антенна Плюс» в условиях опытно-промышленных испытаний системы видеообработки информации.

Предложенные модель, метод и устройство построения карты глубин стереоизображения на основе обобщённой математической модели иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения, используются в образовательном процессе кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета в рамках дисциплин 09.03.01 «Теория нечёткой логики и множеств» и 09.06.01 «Автоматизированные нечётко-логические системы в промышленности», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Соответствие паспорту специальности.

Согласно паспорту специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1 и 2 паспорта специальности. 1. Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов

функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления, в части разработки схемы вычислительного процесса и структурно-функциональной организации построения карты глубин стереоизображения с применением модифицированного фильтра Канни и аппарата нечёткой логики, позволяющее повысить точность выделения границ объектов и создания карты глубин стереоизображения. 2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях, с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик, в части разработки модели, метода и устройства построения карты глубин стереоизображения на основе получения экспериментальных результатов построения карты глубин стереоизображения с оценкой точности коэффициентами PSNR и RMSE, доказывающие эффективность разработанных модели, метода и устройства.

Апробация результатов исследования. Диссертационная работа отражает результаты научных исследований, проводимых с 2015 по 2021 годы.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 19 Международных и Всероссийских научно-технических конференциях: «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (г. Курск, 2017, 2018, 2019, 2021), «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (г. Вологда, 2017), «Нелинейная динамика машин» (г. Москва, 2017), «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 2017), «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника» (г. Севастополь, 2017), «Интеллектуальные и информационные системы» (г. Тула, 2017), «Мехатроника, автоматика и робототехника» (г. Новокузнецк, 2018), «Исторические, философские, методологические проблемы современной науки» (г. Курск, 2018), «Юбилейная XXX международная инновационная конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения» (г. Москва, 2018), «XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019)» (г. Москва, 2019), «Новые информационные технологии и системы» (г. Пенза, 2019), «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (г. Москва, 2019), «Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике» (г. Иннополис, 2019), «Медико-экологические информационные технологии-2020» (г. Курск, 2020), «Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС - 2020)» (г. Вологда, 2020), «Завалишинские чтения 2021» (г. Санкт-Петербург, 2021).

Личный вклад автора. Выносимые на защиту научные положения разработаны соискателем лично. В научных работах, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: построение обобщённой математической модели иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения [4 - 7, 11 - 16, 22, 26 - 30], разработка метода построения карты глубин стереоизображения [1 - 3, 8, 9, 17 - 21, 23 - 25], создание устройства построения карты глубин стереоизображения [1, 2, 17], выполнение экспериментального исследования построения карты глубин стереоизображения [21], описание алгоритма построения карты глубин стереоизображения [18], формирование правил выделения границ объектов модифицированным фильтром Канни [20], проведение анализа методов нечёткой импликации [10].

Публикации. По теме диссертации опубликованы 30 научных работ, в том числе 6 статей в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 6 работ, входящих в международную базу данных Scopus и WoS (1 статья опубликована в международном журнале с квартилем Q1), 1 глава в монографии, получено 3 патента РФ на изобретение и 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 118 наименований, и 2 приложений. Диссертационное исследование изложено на 148 страницах машинописного текста и содержит 79 рисунков, 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются область исследования, цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы. Также выделяются основные положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации и общей структуре диссертации.

В первой главе выполняется анализ существующих систем и устройств для построения карты глубин и методов выделения границ объектов, рассмотрены особенности, влияющие на точность построения карты глубин, и методы повышения точности её формирования. Выполнен патентный поиск аналогов и произведён их обзор и анализ. Произведена классификация методов и устройств построения карты глубин (рисунок 1).

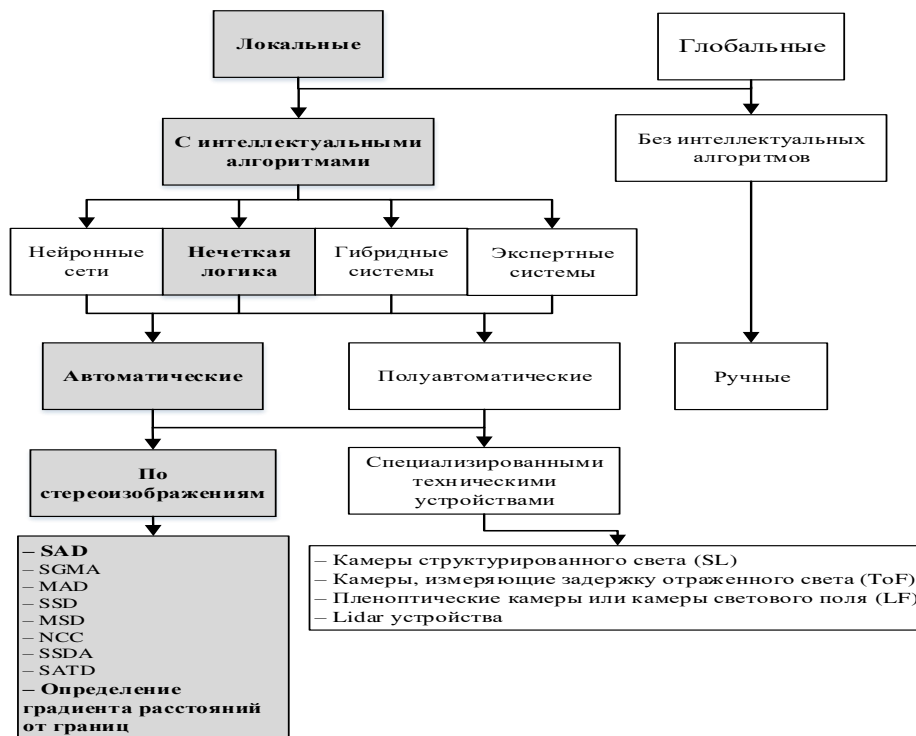


Рисунок 1 – Классификация методов и устройств построения карты глубин стереоизображения

В большинстве рассмотренных моделей и методов, одним из основных факторов, ухудшающим точность построения карты глубин, является изначально некачественная стереопара, где пиксели на левом изображении более засвечены или кардинально затемнены относительно правого кадра и наоборот. Решением данной задачи является применение методов построения карты глубин стереоизображения, мало зависящих от

качества исходной стереопары. В работе была представлена гипотеза, чтобы яркость пикселей исходной стереопары меньше оказывала влияние на конечную карту глубин стереоизображения, требуется использовать аппарат нечёткой логики, позволяющий задать интенсивность яркостей пикселей стереопары диапазоном значений.

Во второй главе разработана обобщённая математическая модель иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения ($M_{\text{инспкг}}$), метод и её реализация в задачах выделения границ объектов по стереопаре и вычисления значения диспаратета при помощи двухуровневой иерархической нечёткой системы.

$M_{\text{инспкг}}$ в теоретико-множественном описании задаётся в виде кортежа по формуле (1):

$$M_{\text{инспкг}} = \langle M_{\text{ппи}}; M_{\text{вк}}; M_{\text{инс}} \rangle, \quad (1)$$

где $M_{\text{ппи}}$ – математическая модель предварительной подготовки изображений, $M_{\text{вк}}$ – математическая модель выделения контуров модифицированным фильтром Канни, $M_{\text{инс}}$ – математическая модель иерархической нечёткой системы.

Математическая модель предварительной подготовки изображений $M_{\text{ппи}}$ формируется за два шага.

Шаг 1. Преобразование цветного изображения в градации серого рассчитывается по формуле (2) (см.рис.12,б):

$$I = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B, \quad (2)$$

где I – интенсивность яркости градации серого в пикселе; R – значение интенсивности красного цвета в пикселе; G – значение интенсивности зелёного цвета в пикселе; B – значение интенсивности синего цвета в пикселе.

Шаг 2. Размытие фильтром Гаусса, преобразованного в градации серого изображения вычисляется по формуле (3) (см.рис.12,в):

$$K_{i,j} = \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 \frac{1}{b} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \times A_{i,j}, \quad A_{i,j} = \begin{bmatrix} I_{(i+2,j-2)} & I_{(i+2,j-1)} & I_{(i+2,j)} & I_{(i+2,j+1)} & I_{(i+2,j+2)} \\ I_{(i+1,j-2)} & I_{(i+1,j-1)} & I_{(i+1,j)} & I_{(i+1,j+1)} & I_{(i+1,j+2)} \\ I_{(i,j-2)} & I_{(i,j-1)} & I_{(i,j)} & I_{(i,j+1)} & I_{(i,j+2)} \\ I_{(i-1,j-2)} & I_{(i-1,j-1)} & I_{(i-1,j)} & I_{(i-1,j+1)} & I_{(i-1,j+2)} \\ I_{(i-2,j-2)} & I_{(i-2,j-1)} & I_{(i-2,j)} & I_{(i-2,j+1)} & I_{(i-2,j+2)} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $K_{i,j}$ – значение для каждого пикселя после размытия; $A_{i,j}$ – матрица значений интенсивности исходного изображения; \times – операция свертки, b – коэффициент нормировки; i – номер пикселя изображения вдоль оси y ($i=1 \dots h$), j – номер пикселя изображения вдоль оси x ($j=1 \dots w$), h – высота изображения в пикселях, w – ширина изображения в пикселях.

Одним из параметров, изменяющих точность построения карты глубин стереоизображения, является коэффициент нормировки b , который подбирается экспериментально и равен 114, в традиционном фильтре Гаусса $b=159$.

Формулы (2) – (3) формируют *математическую модель предварительной подготовки изображений $M_{\text{ппи}}$* в которой по вычисленным параметрам $I_{i,j}$ и $K_{i,j}$ в каждом пикселе создаются размытые левое и правое изображения в оттенках градаций серого.

Математическая модель выделения контуров модифицированным фильтром Канни $M_{\text{вк}}$ формируется за 6 шагов:

Шаг 1. Расчёт градиента $G_{i,j}$ по формуле (4) (см.рис.13,а):

$$G_{i,j} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (4)$$

где G_x – градиент вдоль оси x ; G_y – градиент вдоль оси y .

G_x и G_y определяются в окне размером 3×3 по формуле (5):

$$G_x = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \times K_{i,j}; \quad G_y = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \times K_{i,j}; \quad K_{i,j} = \begin{bmatrix} K_{(i+1,j-1)} & K_{(i+1,j)} & K_{(i+1,j+1)} \\ K_{(i,j-1)} & K_{(i,j)} & K_{(i,j+1)} \\ K_{(i-1,j-1)} & K_{(i-1,j)} & K_{(i-1,j+1)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Шаг 2. Определение октанта $\theta_{i,j}$ в зависимости от угла направления градиента, который определяется арктангенсом отношения градиентов по формуле (6):

$$\theta_{i,j} = \text{round}\left(\left(\text{atan}\left(\frac{G_y}{G_x}\right)\right) / \pi / 4\right), \quad (6)$$

где round – функция округления результата $\theta_{i,j}$ до целого, atan – функция определения арктангенса отношения градиентов.

Направление края границы объекта в модифицированном фильтре Канни рассматривается по направлению градиента в диапазоне от 0° до 360° (в традиционном фильтре Канни направление градиента рассматривается в диапазоне от 0° до 180°). Для определения октанта в формуле (6) добавлено выражение $\pi / 4$, которое округляется до целого значения и вычисляются возможные значения октанта в диапазоне $\theta_{i,j} \in [-4; 4]$.

Шаг 3. Определение максимального значения градиента G_{\max} в окне 3×3 по формуле (7):

$$G_{\max} = \max(G_{i,j}). \quad (7)$$

Шаг 4. Проверка правил принадлежности пикселя к границе. Для определения принадлежности текущего пикселя к границе необходимо рассмотреть обрабатываемый и соседние пиксели (рисунок 2).

P_3	P_2	P_1
P_4	P_8	P_0
P_5	P_6	P_7

Рисунок 2 – Обрабатываемый (P_8) и соседние пиксели (P_0 - P_7)

Правила определения принадлежности пикселя к границе зависят от значения октанта $\theta_{i,j}$, например, при $((\theta = 0)$ ИЛИ $(\theta = 4))$ правило определяется по формуле (8):

Если $(G(P_8) > G(P_2)) \ \& \ (G(P_8) > G(P_6)) \ \& \ (G(P_8) > G_{\max} \cdot T_{\text{high}})$ **То** $P_8 = 1$,

Иначе Если $(G(P_8) > G(P_2)) \ \& \ (G(P_8) > G(P_6)) \ \& \ (G(P_8) < G_{\max} \cdot T_{\text{low}})$ **То** $P_8 = 1$, (8)

Иначе $P_8 = 0$.

Правила для остальных значений $\theta_{i,j}$ представлены в пункте 2.1.2 диссертационного исследования. ЕСЛИ обрабатываемый пиксель $P_8 = 1$, ТО это граница (закрашивается белым цветом), ИНАЧЕ ЕСЛИ $P_8 = 0$, ТО этот пиксель не является границей (закрашивается черным цветом).

Значения верхнего и нижнего порогов определяются экспериментально и равны соответственно $T_{\text{high}}=0,1$ и $T_{\text{low}}=0,01$. Пороговые значения T_{high} и T_{low} изменяют точность построения карты глубин стереоизображения, оцениваемую коэффициентом RMSE.

Шаг 5. Удаление концевых точек. Полученные с помощью модифицированного фильтра Канни границы обладают недостатками, такими как неравномерная толщина и разрывы. Есть ряд пикселей, которые располагаются около границ и их требуется удалить. Тем самым сокращается число дальнейших обрабатываемых точек

иерархической нечёткой системой и как следствие сокращается число вычислительных операций в устройстве построения карты глубин стереоизображения.

Пиксели $P_0 \dots P_8$ принимают значения логического «0» или «1». Получив значение пикселей $P_0 \dots P_7$ необходимо определить значение P_8' по формуле (9):

$$P_8' = P_8 \& !((\bar{P}_0 \& \bar{P}_1 \& \bar{P}_2 \& \bar{P}_3 \& \bar{P}_4 \& \bar{P}_5 \& \bar{P}_6 \& \bar{P}_7) \vee (\bar{P}_0 \& \bar{P}_1 \& \bar{P}_2 \& \bar{P}_3 \& \bar{P}_4 \& P_5 \& P_6 \& P_7) \vee (P_0 \& P_1 \& \bar{P}_2 \& \bar{P}_3 \& \bar{P}_4 \& \bar{P}_5 \& \bar{P}_6 \& P_7) \vee (\bar{P}_0 \& P_1 \& P_2 \& P_3 \& \bar{P}_4 \& \bar{P}_5 \& \bar{P}_6 \& \bar{P}_7) \vee (\bar{P}_0 \& \bar{P}_1 \& \bar{P}_2 \& P_3 \& P_4 \& P_5 \& \bar{P}_6 \& \bar{P}_7)), \quad (9)$$

где ! – операция общей инверсии.

ЕСЛИ пиксель P_8' имеет значение «0», ТО пиксель закрашивается белым цветом, ИНАЧЕ ЕСЛИ пиксель P_8' имеет значение «1», ТО закрашивается черным цветом. По формуле (9) реализуется удаление концевых точек, в которой пикселям присваиваются значения логического «0» или «1».

Шаг 6. Объединение разрывов. Выполнив выделение границ и удалив концевые точки необходимо проверить границы на разрывы и если они обнаружены, то выполнить их объединение. По формуле (10) выполняется определение наличия разрывов границ:

$$P_8'' = ((P_0 \vee P_7) \& (P_3 \vee P_4)) \vee ((P_0 \vee P_1) \& (P_5 \vee P_4)) \vee ((P_1 \vee P_2) \& (P_5 \vee P_6)) \vee ((P_2 \vee P_3) \& (P_6 \vee P_7)). \quad (10)$$

В формуле (10) если $P_8'' = 1$, то пиксель P_8'' закрашивается белым цветом, иначе черным цветом. Формула (10) позволяет объединить контура границ, которые не определились на предыдущих этапах (см.рис.13,в).

Формулы (4) – (10) формируют *математическую модель выделения контуров модифицированным фильтром Канни МВК*, позволяющую на изображениях стереопары выделить границы, удалить концевые точки и объединить разрывы границ.

Математическая модель иерархической нечёткой системы МинС, формируется за 11 шагов. Выполнив предварительную подготовку изображений и выделение контуров на левом и правом изображениях стереопары с использованием модифицированного фильтра Канни, строится иерархическая нечёткая система. Структура иерархической нечёткой системы представлена на рисунке 3.

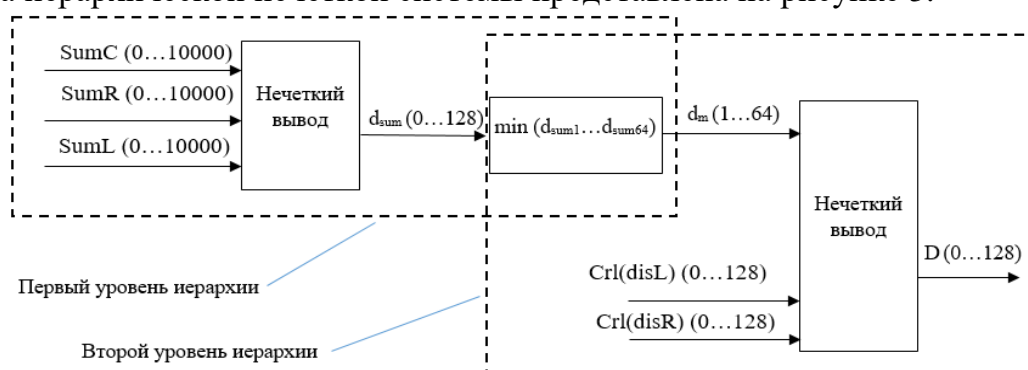


Рисунок 3 – Структурно-функциональная организация иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения

Шаг 1: Расчёт разности уровней интенсивностей для левого и правого изображений стереопары. Вокруг пикселя с координатами (i, j) формируется окно размером 3×3 . После чего находится разница значений интенсивностей по каждому из трёх каналов R, G, B между левым и правым изображениями, рассчитываемое по формуле (11):

$$\text{Sum}(i, j, d) = \sum_{-v}^v R \sum_{-v}^v G \sum_{-v}^v B |I_L(i+m, j+n) - I_R(i+m+d, j+n)|, \quad (11)$$

где Sum – сумма абсолютных разностей; I_L , I_R – интенсивность цвета на левом и правом изображениях; v – размер окна; m , n – координаты пикселей внутри окна, d – величина смещения в пикселях.

Определив сумму разностей значений интенсивностей по трём каналам R, G, B в окне размером 3x3 строится массив значений Sum, в котором для точки с координатами (i, j) определяются суммы разностей между левым и правым изображениями в зависимости от величины смещения d в пикселях.

Для улучшения точности построения карты глубин стереоизображения вычисляется сумма абсолютных разностей в трёх позициях: центральная позиция окна поиска SumC (формула 11), смещённая позиция окна поиска влево на три пикселя SumL (формула 12) и смещённая позиция окна поиска вправо на три пикселя SumR (формула 13), что позволяет улучшить точность построения карты глубин стереоизображения, оцениваемую коэффициентом пикового отношения сигнал/шум PSNR:

$$\text{Sum L}(i-3, j, d) = \sum_{-v}^v R \sum_{-v}^v G \sum_{-v}^v B |I_L((i-3)+m, j+n) - I_R((i-3)+m+d, j+n)|; \quad (12)$$

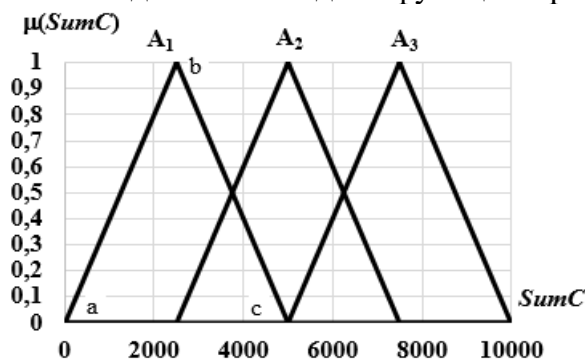
$$\text{Sum R}(i+3, j, d) = \sum_{-v}^v R \sum_{-v}^v G \sum_{-v}^v B |I_L((i+3)+m, j+n) - I_R((i+3)+m+d, j+n)|. \quad (13)$$

Шаг 2: Построение функций принадлежности нечёткой системы первого уровня иерархии. На вход первой ступени иерархии нечёткой системы поступают переменные SumC, SumL и SumR, которые являются входными, а выходом является значение координаты минимального значения диспаратета d_{sum} . Значения SumC, SumL и SumR находятся в диапазоне от 0 до 10000. Расчёт степеней функций принадлежности выполняется по формуле (14):

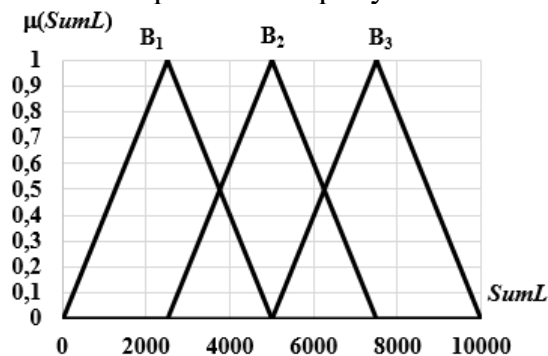
$$\mu(\text{Sum}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{Sum} \notin [a; c]; \\ \frac{\text{Sum} - a}{b - a}, & \text{если } \text{Sum} \in [a; b]; \\ \frac{c - \text{Sum}}{c - b}, & \text{если } \text{Sum} \in [b; c]; \end{cases} \quad (14)$$

где a , b , c – координата вершины соответствующего треугольника (см. рис.4а).

Входные и выходная функции принадлежности изображены на рисунке 4.



а)



б)

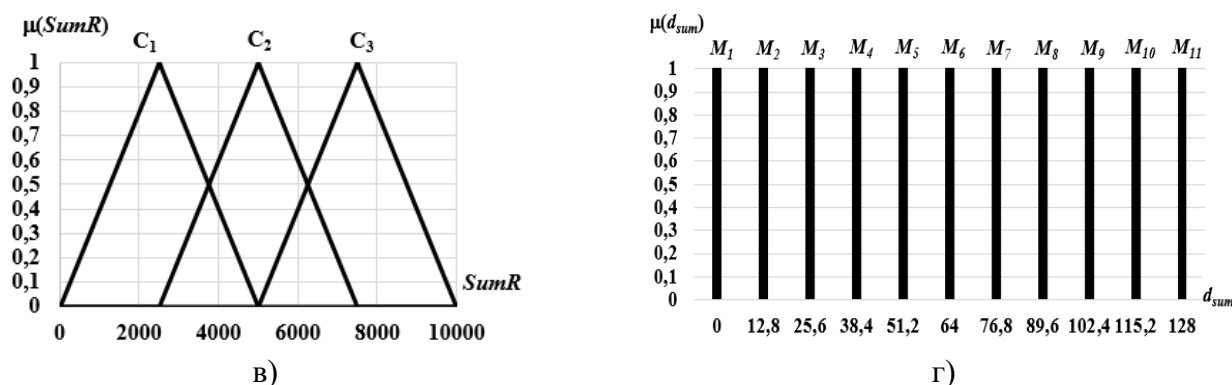


Рисунок 4 – Функции принадлежности первого уровня иерархии нечёткой системы: а-в – входные переменные SumC, SumL, SumR; г – выходная переменная диспаритет d_{sum}

Шаг 3: Синтез нечётких правил первого уровня иерархии. Для обеспечения свойства полноты базы нечётких правил и с учётом рекомендаций А. Пегата минимальное число правил определяется как $r^k=3^3=27$ (где r – количество функций принадлежности у нечёткой переменной, k – количество нечётких переменных).

Нечёткие правила задаются по методу mean (метод среднего) и представлены в формуле (15):

$N_1=(A_1+B_1+C_1)/3;$	$N_2=(A_1+B_1+C_2)/3;$	$N_3=(A_1+B_1+C_3)/3;$	$N_4=(A_1+B_2+C_1)/3;$	(15)
$N_5=(A_1+B_2+C_2)/3;$	$N_6=(A_1+B_2+C_3)/3;$	$N_7=(A_1+B_3+C_1)/3;$	$N_8=(A_1+B_3+C_2)/3;$	
$N_9=(A_1+B_3+C_3)/3;$	$N_{10}=(A_2+B_1+C_1)/3;$	$N_{11}=(A_2+B_1+C_2)/3;$	$N_{12}=(A_2+B_1+C_3)/3;$	
$N_{13}=(A_2+B_2+C_1)/3;$	$N_{14}=(A_2+B_2+C_2)/3;$	$N_{15}=(A_2+B_2+C_3)/3;$	$N_{16}=(A_2+B_3+C_1)/3;$	
$N_{17}=(A_2+B_3+C_2)/3;$	$N_{18}=(A_2+B_3+C_3)/3;$	$N_{19}=(A_3+B_1+C_1)/3;$	$N_{20}=(A_3+B_1+C_2)/3;$	
$N_{21}=(A_3+B_1+C_3)/3;$	$N_{22}=(A_3+B_2+C_1)/3;$	$N_{23}=(A_3+B_2+C_2)/3;$	$N_{24}=(A_3+B_2+C_3)/3;$	
$N_{25}=(A_3+B_3+C_1)/3;$	$N_{26}=(A_3+B_3+C_2)/3;$	$N_{27}=(A_3+B_3+C_3)/3.$		

Шаг 4: Усечение функций принадлежности в зависимости от нечётких правил. Осуществляя нечёткую композицию выполняется свертка 27 нечётких правил к 11 заключениям нечёткого вывода, чтобы каждое композиционное нечёткое правило соответствовало каждому терму выходной переменной. Нечёткая импликация рассчитывается по формуле (16):

$Y_1 = N_{27};$	$Y_2 = (N_{24}+N_{26})/2;$	$Y_3 = (N_{21}+N_{23}+N_{25})/3;$	(16)
$Y_4 = (N_{18}+N_{20}+N_{22})/3;$	$Y_5 = (N_{15}+N_{17}+N_{19})/3;$	$Y_6 = (N_{12}+N_{14}+N_{16})/3;$	
$Y_7 = (N_9+N_{11}+N_{13})/3;$	$Y_8 = (N_6+N_8+N_{10})/3;$	$Y_9=(N_3+N_5+N_7)/3;$	
$Y_{10} = (N_2+N_4)/2;$	$Y_{11} = N_{11}.$		

Шаг 5: Дефаззификация чёткого значения d_{sum} . Вычисляется по методу упрощённого центра тяжести и представлена в формуле (17) (см. рис. 15,б):

$$d_{sum} = \frac{\sum_{i=1}^{11} M_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^{11} Y_i}, \quad (17)$$

где M_i – метки выходной нечёткой функции принадлежности (рис. 4,г).

Расчитанные значения d_{sum} по формуле (17) записываются в массив значений диспаритета на выходе первого уровня иерархии нечёткой системы.

Шаг 6: Поиск минимального значения диспаритета d_{sum} в массиве l -тых пикселей относительно обрабатываемого ($l=64$). Определив d_{sum} , относительно обрабатываемого пикселя рассматриваются правые от него l -тые пиксели, расположенные в строке и для них, также вычисляется d_{sum} , после этого выполняется поиск минимального значения

d_{sum} в этих 1 пикселях. Обнаружив минимальное значение d_{sum} в массив записывается номер пикселя l с наименьшим значением d_{sum} (рисунок 5), определяемый по формуле (18). Значения d_m являются входными данными переменной второго уровня иерархии нечёткой системы (см.рис.3).

	проверяемый пиксель	соседние пиксели справа относительно проверяемого							
номер пикселя, l	1	2	3	4	5	6	63	64
Значение диспаритета, d_{sum}	78	64	44	35	20	14	25	32

Минимальное значение диспаритета в шестом пикселе относительно проверяемого пикселя

Рисунок 5 – Пример определения координаты пикселя с минимальным значением диспаритета ($d_m=6$)

$$d_m = \min(d_{sum1}; \dots; d_{sumk}). \quad (18)$$

Номер пикселя с минимальным значением d_{sum} равняется 6, поэтому $d_m = 6$ (см.рис. 5).

Шаг 7: Определение расстояния до границы в пикселях выполняется следующим образом:

Для всех пикселей в строке начиная с нулевого проверяется условие: ЕСЛИ $P_8 = 0$ (пиксель не является границей и закрашен черным цветом), ТО начинается цикл поиска границы до тех пор, пока P_8 не станет равен «1» (является границей и закрашен белым цветом). Каждому пикселю не являющимся контуром присваивается значение градиента, инкрементируемое на единицу до тех пор, пока не обнаружен пиксель-граница. Когда пиксель-граница найдена, то цикл подсчёта количества пикселей, не являющихся контуром обнуляется и начинается вновь с пикселя-границы. Проход выполняется по всей ширине изображения. Завершив проход по строке, выполняется переход вниз на одну строку, и аналогично считаются пиксели до границы. Данная операция выполняется по всем строкам изображения. Заканчивается проход, когда проверены все пиксели изображения. При этом цикл подсчёта пикселей выполняется слева направо и справа налево. Выполнив проход слева и справа вычисляется $Crl(disL)$ и $Crl(disR)$, как разница расстояний ($disL$ для левого и $disR$ правого изображения стереопары, значения $disL$ и $disR$ принадлежат диапазону $[0;255]$), взятая по модулю, между левым и правым проходами. Тем самым определяются расстояния в пикселях до контуров объектов слева и справа относительно краёв на левом и правом изображениях стереопары (формулы 19-20).

$$disL_L = \begin{cases} 0, \text{ если } P_8 = 1 \text{ (контур)}; \\ disL_L + 1, \text{ если } P_8 = 0 \text{ (не контур)}. \end{cases} \quad disL_R = \begin{cases} 0, \text{ если } P_8 = 1 \text{ (контур)}; \\ disL_R + 1, \text{ если } P_8 = 0 \text{ (не контур)}. \end{cases} \quad (19)$$

$$disR_L = \begin{cases} 0, \text{ если } P_8 = 1 \text{ (контур)}; \\ disR_L + 1, \text{ если } P_8 = 0 \text{ (не контур)}. \end{cases} \quad disR_R = \begin{cases} 0, \text{ если } P_8 = 1 \text{ (контур)}; \\ disR_R + 1, \text{ если } P_8 = 0 \text{ (не контур)}. \end{cases} \quad (20)$$

где $disR_L$ и $disR_R$ – расстояния в пикселях до границ слева и справа на правом стереоизображении; $disL_L$ и $disL_R$ – расстояния в пикселях до границ слева и справа на левом стереоизображении.

Далее строится карта расстояний градиентов до границ объектов (см. рис.14). В которой пиксели находящиеся ближе к границе имеют более светлый оттенок, а удаленные от контура более тёмные. Переменные $Crl(disL)$ и $Crl(disR)$ рассчитываются по формулам (21) и (22):

$$Crl(disL)(i, j, d) = \left| disL_L(i + m, j + n) - disL_R(i + m + d, j + n) \right|, \quad (21)$$

$$Crl(disR)(i, j, d) = \left| disR_L(i + m, j + n) - disR_R(i + m + d, j + n) \right|. \quad (22)$$

Шаг 8: Построение функций принадлежности нечёткой системы второго уровня иерархии. Входные и выходная функции принадлежности изображены на рисунке 6. Входными переменными второго уровня иерархии являются переменные $Crl(disR)$, $Crl(disL)$, d_m , а выходная переменная значения диспаратета по которому строится карта глубин стереоизображения.

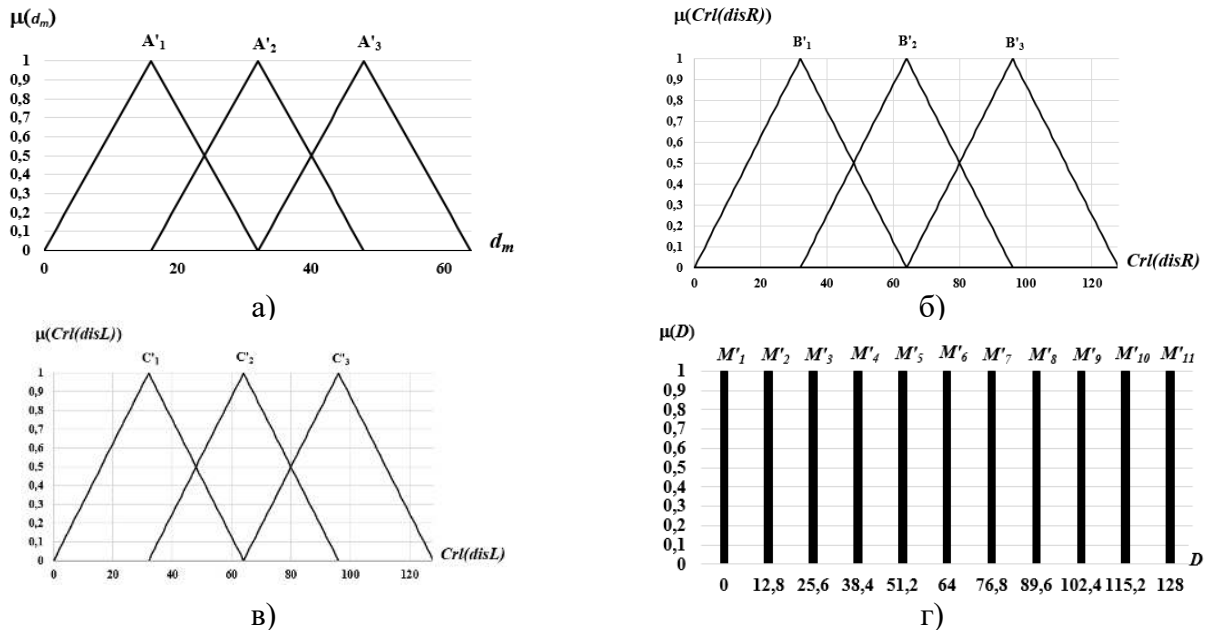


Рисунок 6 – Функции принадлежности второй ступени иерархии нечёткой системы: а-в – входные переменные d_m , $Crl(disR)$, $Crl(disL)$; г – выходная переменная диспаратет D

Входные функции принадлежности второго уровня иерархии задаются формулой (14).

Шаги 9. Синтез нечётких правил второго уровня иерархии. По формуле (15) вычисляются значения $N_1' \dots N_{27}'$.

Шаг 10. Усечение функций принадлежности в зависимости от нечётких правил для второго уровня иерархии. По формуле (16) вычисляются значения $Y_1' \dots Y_{11}'$.

Шаг 11. Расчёт значения диспаратета на выходе второго уровня иерархии. По формуле (17) вычисляются значение диспаратета D .

Шаги 9 – 11 выполняются аналогично шагам 3÷5.

По формулам (11) – (22) формируется **математическая модель иерархической нечёткой системы Минс**, в которой рассчитываются значения диспаратета по двум изображениям стереопары.

По формулам (1) – (22) реализуется **обобщённая математическая модель иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения Минспкг** и синтезируется **метод построения карты глубин стереоизображения**, выполняемый за 12 шагов:

1. Получить два цветных изображения стереопары (рисунок 11).
2. Преобразовать цветные изображения стереопары в градации оттенков серого (формула 2).
3. Выполнить размытие изображений фильтром Гаусса (формула 3).
4. Рассчитать значение градиентов и определить октант в зависимости от угла направления градиента (формулы 4-6).
5. Выполнить поиск пикселя с максимальным значением градиента в окне 3x3 (формула 7).
6. Выделить границы на двух изображениях стереопары (формула 8).
7. Удалить концевые точки (формулы 9).
8. Объединить разрывы границ (формула 10).
9. Сформировать первый уровень иерархической нечёткой системы и получить значение диспаратета d_{sum} (формулы 11-17). Найти координату пикселя d_m (формула 18) с минимальным значением d_{sum} в правых k пикселях и запомнить его координату.
10. Вычислить разницу расстояний в пикселях до границ для левого и правого стереоизображений (формулы 19-22).
11. Сформировать второй уровень иерархической нечёткой системы и получить значение диспаратета D (формулы 14-17).
12. Построить карту глубин стереоизображения по полученным в иерархической нечёткой системе значениям диспаратета D .

Новизна метода построения карты глубин стереоизображения заключается в сочетании последовательности логических и арифметических операций, выполняемых на этапах: размытия, преобразованного в градации серого изображений стереопары, выделения контуров модифицированным фильтром Канны, удаления концевых точек, объединения разрывов и расчёта значения диспаратета двухуровневой иерархической нечёткой системой построения карты глубин стереоизображения. Метод позволяет сформировать новые зависимости между входными и выходными переменными иерархической нечёткой системы:

$$D = f(d_m; \text{Crl}(\text{disR}); \text{Crl}(\text{disL}))$$

и $d_{sum} = f(\text{SumC}; \text{SumR}; \text{SumL})$, используемые для построения карты глубин стереоизображения.

В третьей главе рассматривается структурно-функциональная организация построения карты глубин стереоизображения, её алгоритмизация и программная реализация, представленная псевдокодами.

На рисунке 7 представлена структурно-функциональная организация устройства построения карты глубин стереоизображения.

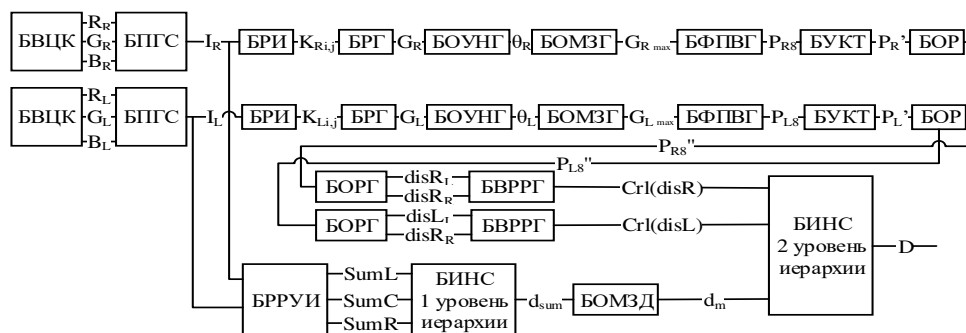


Рисунок 7 – Структурно-функциональная организация построения карты глубин стереоизображения

На рисунке 7 представлены следующие блоки и связи между ними:

БВЦК – блок ввода цветowych компонентов; БПГС – блок преобразования в градации серого; БРИ – блок размытия изображения; БРГ – блок расчёта градиента; БОУНГ – блок определения угла направления градиента; БОМЗГ – блок определения максимального значения градиента; БФПВГ – блок формирования правил выделения границ; БУКТ – блок удаления концевых точек; БОР – блок определения разрывов; БОРГ – блок определения расстояний до границ при проходе слева и справа от границы; БВРГ – блок вычисления разницы расстояний до границ при проходе слева и справа; БРРУИ – блок расчёта разностей уровней интенсивностей; БОМЗД – блок определения минимального значения диспаратета; БИНС – блок иерархической нечёткой системы.

Иерархическая схема вычислительного процесса расчёта диспаратета иерархической нечёткой системой представлена на рисунке 8.

На рисунке 9 представлена компьютерная модель построения карты глубин стереоизображения и графики выходных переменных на выходе первого и второго уровня иерархической нечёткой системы, реализованная в среде имитационного моделирования.

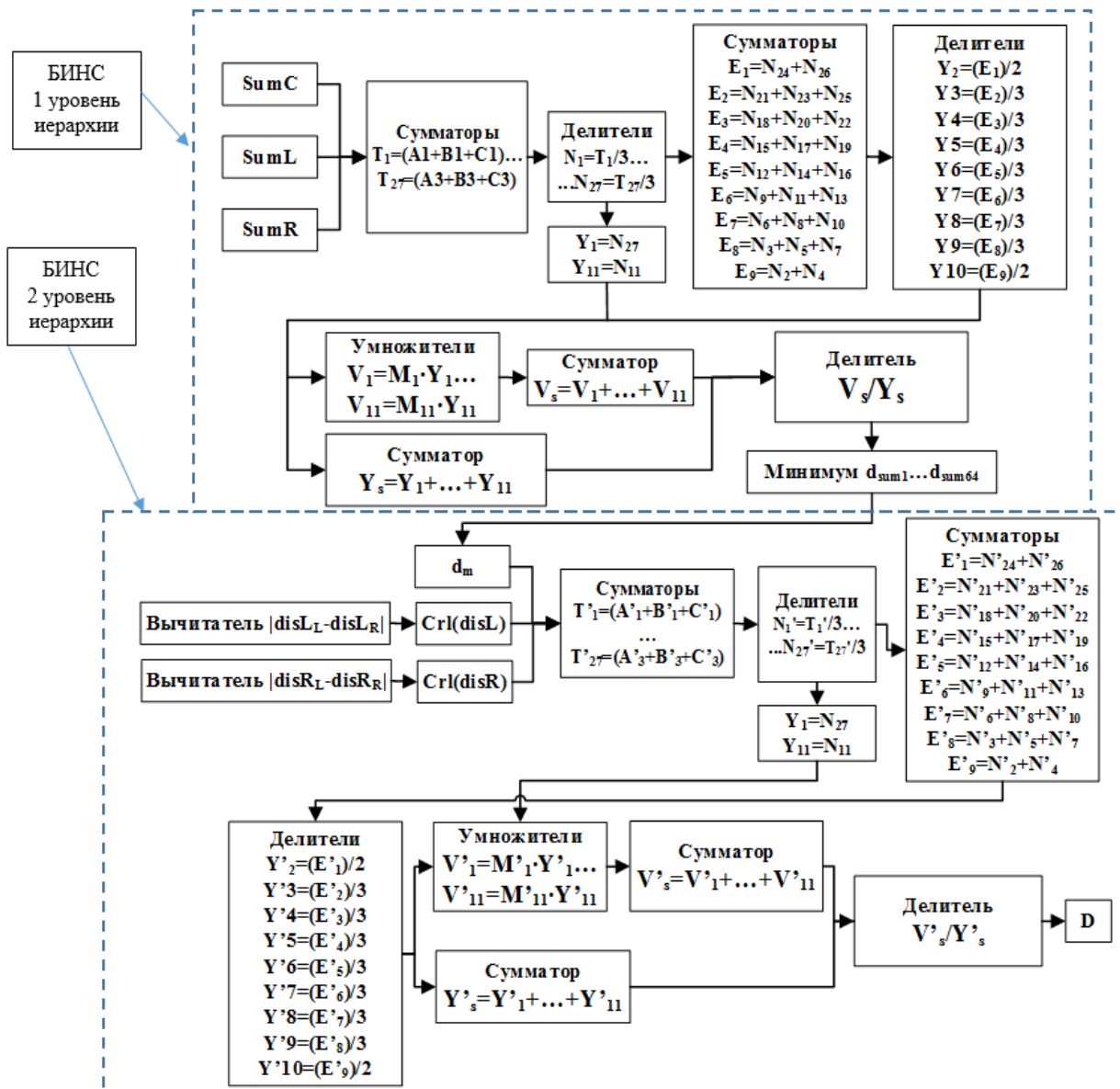
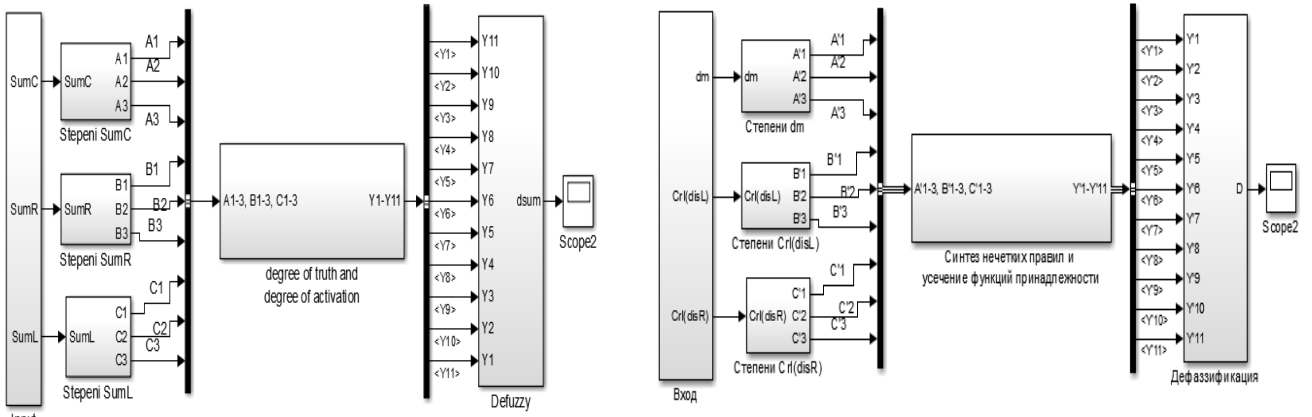
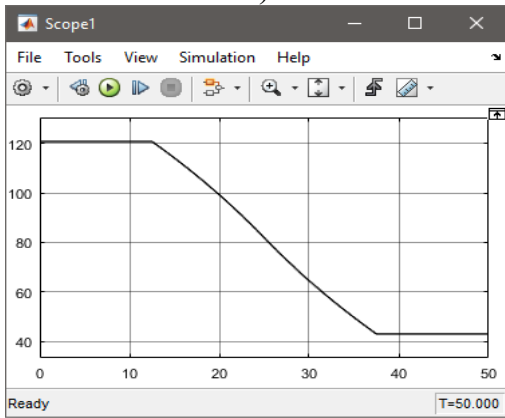


Рисунок 8 – Иерархическая схема вычислительного процесса расчёта диспаратета

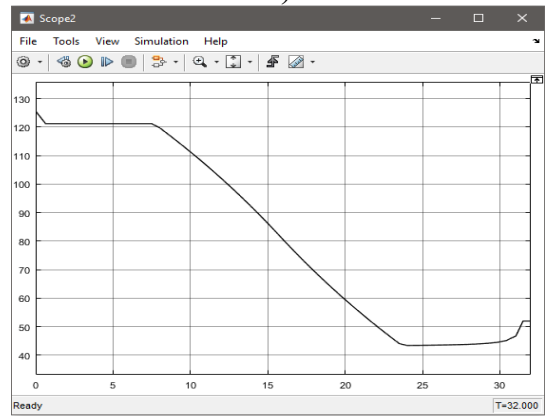


а)

б)



в)



г)

Рисунок 9 – Компьютерная модель построения карты глубин стереоизображения: а – первый уровень иерархии; б – второй уровень иерархии; в, г – изменение диспаратитета на выходах первого и второго уровней иерархии соответственно

Анализ выходных графиков (рисунок 9,в и рисунок 9,г) расчёта диспаратитета на выходе первого и второго уровней иерархической нечёткой системы позволил сделать вывод, что на выходе второго уровня иерархии система позволяет изменять выходное значение в более широком диапазоне значений, т.е. изменяет значение выходной переменной диспаратитета в диапазонах 120-128 и 40-50, следовательно устройство построения карты глубин стереоизображения, реализованное в среде имитационного моделирования, обладает свойством аддитивности.

В четвертой главе выполняется экспериментальное исследование работы устройства построения карты глубин стереоизображения.

На рисунке 10 представлена структурная схема устройства для выполнения экспериментальных исследований, а на рисунке 11 его внешний вид.

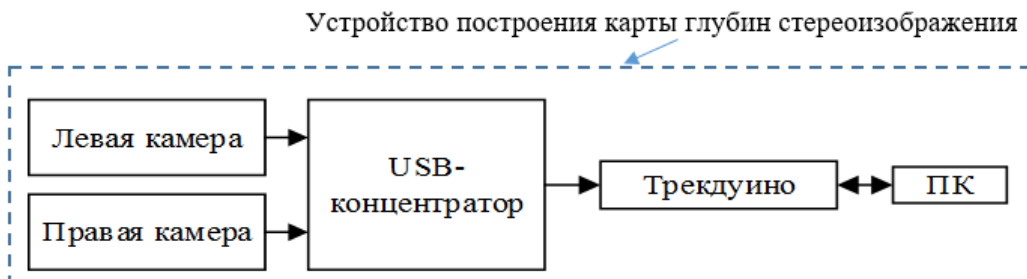


Рисунок 10 – Структурная схема устройства построения карты глубин стереоизображения для выполнения экспериментальных исследований



Рисунок 11 – Устройство построения карты глубин стереоизображения для выполнения экспериментальных исследований

В персональный компьютер загружалась стереопара Cones (рисунок 12,а) из базы стереоизображений Middlebury Stereo Datasets [<http://vision.middlebury.edu/stereo/data>]. Используя *метод построения карты глубин стереоизображения* вначале преобразуются цветные изображения в оттенки градаций серого (рис.12б) и выполняется операция размытия (рисунок 12,в), реализуются на основе математической модели предварительной подготовки изображений $M_{ппи}$ (формулы 2–3).

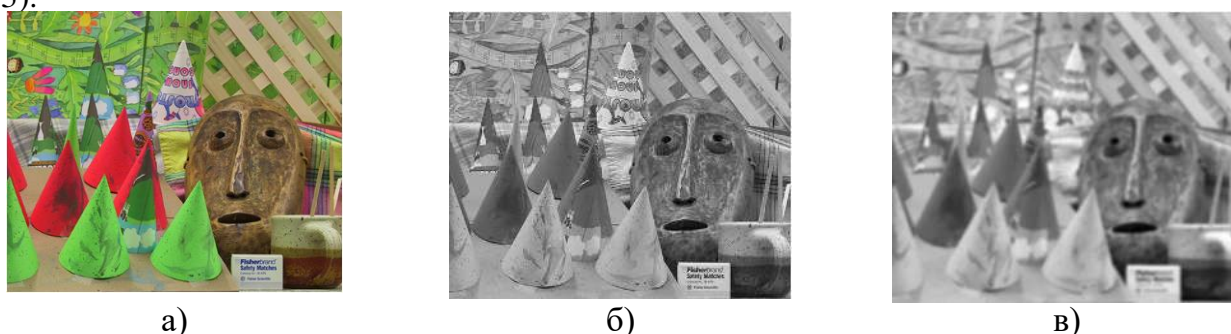


Рисунок 12 Предварительная подготовка изображений: а – Исходное цветное изображение; б – Преобразованное в градации серого; в – Размытое

Далее определялись градиенты изображений стереопары (рис.13а), после чего выделялись границы модифицированным фильтром Канни без операций удаления концевых точек (рис. 13,б) и с добавлением данных операций (рис. 13,в), реализуется на основе математической модели выделения контуров модифицированным фильтром Канни $M_{вк}$ (формулы 4–10).

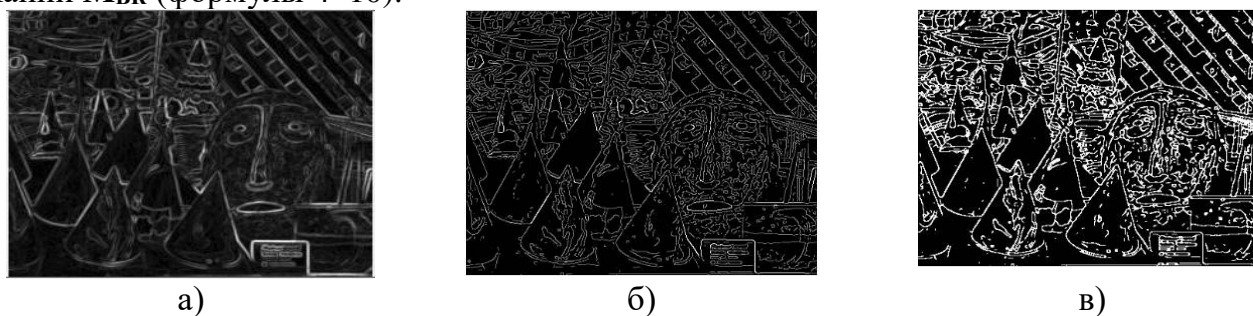


Рисунок 13 – Выделение контуров: а – выделение градиента; б – выделение границ модифицированным фильтром Канни без операций удаления концевых точек и объединения разрывов; в – выделение границ с операциями удаления концевых точек и объединения разрывов

Выделив границы определяется расстояние до них и формируется карта расстояний до контуров изображений (рис.14), затем строится карта глубин (рис.15), реализуется на основе математической модели иерархической нечёткой системы *Минс* (формулы 11–22).



Рисунок 14 – Построение карты расстояний до контуров: а – от левой границы; б – от правой границы

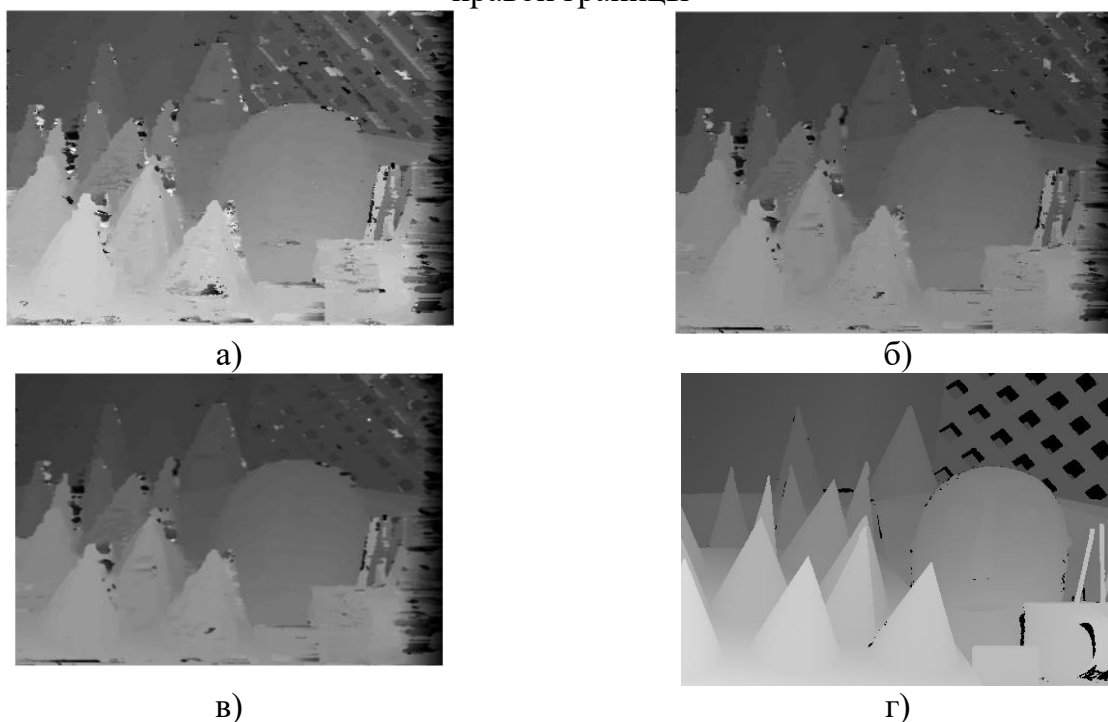


Рисунок 15 – Построение карты глубин стереоизображения: а – метод SAD; б – на выходе первого уровня иерархии нечёткой модели; в – на выходе второго уровня иерархии нечёткой модели; г – эталонная карта глубин

Построив карты глубин вычисляются коэффициенты PSNR и RMSE, оценивающие точность построения карты глубин стереоизображения.

Вычисление RMSE выполняется по формуле (23):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{w \cdot h} \sum_{i=1}^{h-1} \sum_{j=1}^{w-1} (I_{э_{i,j}} - I_{i,j})^2} \rightarrow \min, \quad (23)$$

где $I_{э_{i,j}}$ – значения уровней яркости на эталонной карте глубин стереоизображения; $I_{i,j}$ – значения уровней яркости на получаемом изображении.

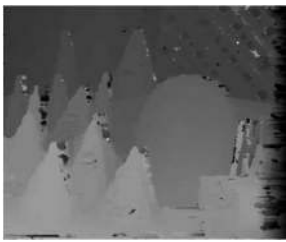
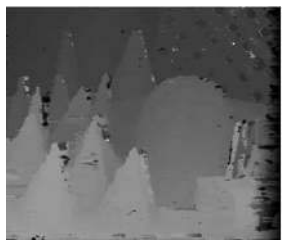


Вычисление PSNR выполняется по формуле (24):

$$\text{PSNR} = 20 \log_{10} \frac{\text{MAX}}{\text{RMSE}} \rightarrow \max, \quad (24)$$

где MAX – наибольшее значение яркости, равное 255.

Анализ точности построения карты глубин стереоизображения был произведен для следующих методов нечёткой импликации (таблица 1), используемых при синтезе нечётких правил (формула 15): mean (среднего), prod (произведения), min (минимального), max (максимального).

Таблица 1 – Сравнительный анализ точности построения карты глубин для стереопары Cones различными методами нечёткой импликации

Метод	Показатель точности	Значение	Карта глубин
mean	RMSE	28,84	
	PSNR	21,53	
prod	RMSE	50,67	
	PSNR	21,41	
max	RMSE	50,27	
	PSNR	21,29	
min	RMSE	60,31	
	PSNR	16,16	

Анализ таблицы 1 показал, что лучший результат получен при использовании метода mean.

Сравнительный анализ точности построения карты глубин стереоизображения с известными методами представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ точности построения карты глубин для стереопары Cones

№	Метод	Показатель точности	Значение
I	Чумаченко А.В.	RMSE	51,79
		PSNR	13,85
II	Кулабухов С.А.	RMSE	37,64
		PSNR	17,49
III	Georgoulas С., Andreadis I.	RMSE	39,7
		PSNR	16,15
IV	Бобырь М.В., Архипов А.Е., Милостная Н.А.	RMSE	31,64
		PSNR	18,13
V	Минспкг	RMSE	28,84
		PSNR	21,53

Анализ таблицы 2 показал, что разработанные модель, метод и устройство построения карты глубин стереоизображения позволяют повысить точность формирования карты глубин стереоизображения в 1,5 раза.

Анализ таблицы 1 и 2 подтвердил гипотезу, что нечёткая логика применима для построения карты глубин стереоизображения при изначально некачественных изображениях стереопары, кроме этого отмечено повышение точности построения карты глубин стереоизображения, на основе оценки коэффициентов RMSE и PSNR. И таким образом система в целом меньше реагирует на изменение интенсивностей яркостей пикселей исходной стереопары.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе в рамках решения поставленной научно-технической задачи разработки модели, метода и устройства построения карты глубин стереоизображения достигнуты следующие основные результаты:

1. Проведён анализ существующих моделей, методов и устройств для построения карты глубин стереоизображения, в результате которого обоснована необходимость создания двухуровневой иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения.

2. Разработана обобщённая математическая модель иерархической нечёткой системы построения карты глубин стереоизображения, включающая в себя математические модели предварительной подготовки изображений, выделения контуров модифицированным фильтром Канни и иерархической нечёткой системы, обладающая свойством аддитивности, позволяющая минимизировать корень из среднеквадратической ошибки по отношению к известным моделям от 1,1 до 1,7 раза.

3. Создан метод построения карты глубин стереоизображения, использующийся для построения новых зависимостей между входными и выходными переменными двухуровневой иерархической нечёткой системы, позволяющий улучшить пиковое отношение сигнал/шум по отношению к известным моделям от 1,19 до 1,55 раза.

4. Разработаны структурно-функциональная организация и устройство построения карты глубин стереоизображения, реализованные по методу построения карты глубин стереоизображения, отличающиеся меньшей аппаратной сложностью по сравнению с известными устройствами от 1,07 до 2,55 раза и позволяющие улучшить точность построения карты глубин стереоизображения методом mean во время нечёткой импликации по отношению к методу prod в 1,8 раза, методу max в 1,7 раза, методу min в 2,09 раза.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для систем выделения объектов на видеоизображениях, с возможностью определения расстояния смещения объектов в видеокадре. Кроме этого позволяет для

мобильных роботов осуществлять выделения объектов на пути их следования и формировать траектории передвижения мобильных роботов.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Использование мягких дефаззификаторов в структуре нечёткого вывода и распараллеливание вычислительного процесса расчёта диспаратета с целью повышения быстродействия процесса построения карты глубин стереоизображения путём реализации на программируемых логических интегральных схемах.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. **Якушев А.С.** Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канни. Часть I [текст] / М.В. Бобырь, А.Е. Архипов, А.С. Якушев, Ц. Цао // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – №4. – С.12-20.
2. **Якушев А.С.** Построение карты глубины с использованием модернизированного фильтра Канни. Часть II [текст] / М.В. Бобырь, А.Е. Архипов, А.С. Якушев, С. Бхаттачарья // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – №5. – С.3-15.
3. **Якушев А.С.** Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации [текст] / М.В. Бобырь, А.Е. Архипов, А.С. Якушев // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т.20. – №2. – С.407-434.
4. **Якушев А.С.** Аппаратно-программный мехатронный комплекс для фиксации подвижных объектов [текст] / М.В. Бобырь, А.А. Дородных, А.С. Якушев, В.А. Булатников // Программная инженерия. – 2020. – Т.11. – №2. – С.77-85.
5. **Якушев А.С.** Нечёткая иерархическая система угловой ориентации мобильного робота. Часть I [текст] / М.В. Бобырь, С.А. Кулабухов, А.С. Якушев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т.17. – №7. – С.458-464.
6. **Якушев А.С.** Нечёткая иерархическая система угловой ориентации мобильного робота. Часть II [текст] / М.В. Бобырь, С.А. Кулабухов, А.С. Якушев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т.17. – №8. – С.531-535.

Публикации в журналах, индексируемых в базе данных Scopus и WoS:

7. **Yakushev A.S.** Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA / M.V. Bobyr, A.S. Yakushev, A.A. Dorodnykh // Measurement: Journal of the International measurement confederation. – 2020. – Vol.152. – Pp.107378. – doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107378 (Q1 IF 3.927).
8. **Yakushev A.S.** Three-coordinate definition of color mark and distance to objects according to stereo Image / M.V. Bobyr, A.S. Yakushev, N.A. Milostnaya // 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics, DCNAIR 2019. – 2019. – Pp.29-31. – doi: 10.1109/DCNAIR.2019.8875548.
9. **Yakushev A.S.** System of stereovision based on fuzzy-logical method of constructing depth map / M.V. Bobyr, A.S. Yakushev, S.A. Kulabukhov, A.E. Arkhipov // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. – 2018. – Pp.8501701. – doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501701.
10. **Yakushev A.S.** Analysis of fuzzy models of implication in the task of controlling a mobile robot / M.V. Bobyr, A.S. Yakushev, A.A. Dorodnykh // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018. – 2018. – Pp.8728798. – doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728798.
11. **Yakushev A.S.** Fuzzy model for capturing moving object with pneumatic mechanisms / M.V. Bobyr, S.A. Kulabukhov, A.V. Sorokoletova, A.S. Yakushev // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018. – 2018. – Pp. 8728591. – doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728591.
12. **Yakushev A.S.** Fuzzy algorithm of a mobile robot's motion / M.V. Bobyr, A.S. Yakushev, N.A. Milostnaya // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. – 2016. – Pp. 355-360. – doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910971.

Патенты:

13. Пат. №2670826 Российская Федерация, МПК В25J 5/00, В25J 9/16, G05B 19/045, G05D 1/02. Способ и устройство мобильного робота для прохождения замкнутых контуров и лабиринтов / С.А. Кулабухов, М.В. Бобырь, **А.С. Якушев**. Заявитель и патентообладатель: Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). – № 2017129984; заявл. 24.08.2017; опубл. 25.10.2018; Бюл. №30.
14. Пат. №2676114 Российская Федерация, МПК В23Q 11/10, В23Q 15/00. Устройство и способ управления температурой в зоне резания / М.В. Бобырь, М.А. Абдулджаббар, **А.С. Якушев**. Заявитель и патентообладатель: Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). – №2017129946; заявл. 24.08.2017; опубл. 26.12.2018; Бюл. №36.
15. Пат. №2709125 Российская Федерация, МПК В23Q 11/10, В23Q 15/18. Способ и устройство для управления охлаждением режущего инструмента при обработке изделий на оборудовании с ЧПУ / М.Ю. Лунева, А.А. Дородных., **А.С. Якушев**, М.В. Бобырь, А.Е. Архипов. Заявитель и патентообладатель: Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). – №2018117316; заявл. 10.05.2018; опубл. 16.12.2019; Бюл. №35.

Научные статьи, опубликованные в других изданиях РИНЦ:

16. Обучение нейро-нечётких систем [Текст]: монография / М.В. Бобырь. – М.: ИНФРА-М, 2017 – С. 240, раздел: 4.1 – «Нечёткая иерархическая система угловой ориентации мобильного робота» – С. 185-204.
17. **Якушев А. С.** Модернизированный фильтр Канни для построения карт глубин [Текст]/ М.В. Бобырь, А.Е. Архипов, А.С. Якушев // Завалишинские чтения 21: сборник трудов XVI международной конференции по электромеханике и робототехнике. – Санкт-Петербург, 2021. – С.20-24.
18. **Якушев А. С.** Алгоритм построения карты глубины методом определения градиента расстояний от границ изображений / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, А.С. Якушев // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений (Распознавание-2021): материалы XVI Международной научно-технической конференции. – Курск, 2021. – С.72-74.
19. **Yakushev A.S.** Three-coordinate definition of color mark and distance to objects according to stereo image / M.V. Bobyr, N.A. Milostnaya, Yakushev A.S.// Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике (Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics): сборник материалов III Международной школы-конференции молодых учёных. – Иннополис, 2019. – С. 38-40.
20. **Якушев А. С.** Правила выделения контуров объектов на изображениях модифицированным фильтром Канни // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений (Распознавание-2021): материалы XVI Международной научно-технической конференции. – Курск, 2021. – С.261-263.
21. **Якушев А. С.** Метод обработки стереоизображений для управления мобильным роботом / М.В. Бобырь, А.Е. Архипов, А.С. Якушев // XXX международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов: сборник трудов конференции. – Москва, ИМАШ РАН, 2019. – С.436-439.
22. **Якушев А. С.** Метод центра тяжести с коррекцией для распознавания цветовой метки // Медико-экологические информационные технологии-2020: сборник научных статей XXIII Международной научно-технической конференции. Часть 2. – Курск, 2020. – С.124-128.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

23. Бобырь М.В., Архипов А.Е., **Якушев А.С.** Программа расчёта расстояния перемещения объектов на основе распознавания цветовой метки/ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020665538, заявл.11.11.2020, опубл.27.11.2020.
24. Бобырь М.В., Архипов А.Е., **Якушев А.С.** Программа расчёта перемещения объектов на двумерных изображениях / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020664468, заявл. 11.11.2020, опубл. 13.11.2020.
25. Бобырь М.В., Милостная Н.А., **Якушев А.С.** Программа для графической обработки изображений/ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020667278, заявл. 08.12.2020, опубл. 22.12.2020.

26. Бобырь М.В., Дородных А.А., **Якушев А.С.** Программа для управления автоматизированным мехатронным комплексом с помощью операторской панели / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019610810, заявл. 29.12.2018, опубл. 18.01.2019.

27. Кулабухов С.А., Бобырь М.В., **Якушев А.С.** Программа обучения дефаззификации для метода разности площадей / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016612747, заявл. 28.12.2015, опубл. 9.03.2016.

28. Кулабухов С.А., Бобырь М.В., **Якушев А.С.** Программа нечётко-логического вывода разными методами дефаззификации и проведения их сравнительного анализа / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615804, заявл. 04.04.2016, опубл. 20.06.2016.

29. Кулабухов С.А., Бобырь М.В., **Якушев А.С.** Программа автоматизированной адаптации функций принадлежности для алгоритмов нечётко-логического вывода / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615425, заявл. 25.03.2016, опубл. 20.06.2016.

30. Кулабухов С.А., Бобырь М.В., **Якушев А.С.** Программа управления мобильным роботом для ориентации его в пространстве и обхождения препятствий / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015619396, заявл. 6.07.2015, опубл. 2.09.2015.

Подписано в печать __. __. 202_ г. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов _____. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Юго-Западный государственный университет,
305000, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94 Отпечатано в ЮЗГУ