

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Милостной Натальи Анатольевны «Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейро-нечётких систем технического зрения», представленную по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика на соискание учёной степени доктора технических наук

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время развитие отечественных промышленных предприятий характеризуется активным внедрением интеллектуальных высокопроизводительных систем технического зрения в роботизированные комплексы, обладающие собственной системой машинного зрения и навигации в неизвестной окружающей среде. Научная проблема, на решение которой направлено диссертационное исследование Милостной Н.А., – развитие теоретических основ обработки стереоизображений на основе нейро-нечёткого подхода, обеспечивающего увеличение быстродействия обработки стереоинформации в нейро-нечётких моделях при соблюдении требуемой точности вычислений. В работе соискатель проводит обзор известных способов решения данной проблемы и их недостатков, определяет актуальные задачи, стоящие перед исследователями и разработчиками высокопроизводительных систем технического зрения для их использования в режиме реального времени. Объединив методы формирования нечётко-логического вывода с новыми моделями оптимизации и обработки стереоизображений, диссертант добилась значительного повышения производительности интеллектуальных систем технического зрения. Такое объединение обеспечено за счёт разработки и комбинации новых взаимосвязанных методов и математических моделей, позволяющих в реальном времени из полученной стереоинформации (RGB изображения) определить трёхмерные координаты объекта по синтезируемым картам глубин. Таким образом, разработка совокупности методов, позволяющих повысить производительность обработки видео и стереоинформации, которая соискателем определяется, как методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейро-нечётких систем технического зрения, является решением научной проблемы диссертационного исследования.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для управления сложными роботизированными комплексами, использующими в качестве оцувствления системы технического зрения, основанные на обработке стереоинформации.

Актуальность избранной темы исследования подтверждается выполнением диссертации в рамках грантов Президента РФ МК-470.2009.8, МК-277.2012.8, Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт №14.740.11.1003), по Госзаданиям Минобрнауки

России (соглашения №7.3522.2011, № 2.3440.2017/4.6, № 0851-2020-0032), в рамках выполнения гранта Российского научного фонда № 23-21-00071, а также соответствием Указу Президента РФ от 7.07.2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ» в части технологии информационных, управляющих, навигационных систем (обеспечение перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта).

Вышеизложенное подчеркивает актуальность темы диссертационного исследования и значимость решаемой проблемы для различных приложений робототехники и цифровой обработки информации.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Структура диссертационной работы соответствует цели и задачам исследования, включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 350 страницах машинописного текста, содержит 49 таблиц и 116 рисунков. По каждой главе диссертационной работы сделаны выводы о полученных научных результатах. В приложениях представлены псевдокоды программ, реализующих разработанные в исследовании алгоритмы работы нейро-нечеткой системы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована научная проблема, цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, приведены результаты реализации работы.

В первой главе соискатель исследует современное состояние поставленной в диссертационной работе проблемы, рассматривает известные современные системы технического зрения для интеллектуальных роботизированных комплексов. В первой главе предложены пути применения в системах технического зрения новых методов и алгоритмов, обеспечивающих повышение точности распознавания карт глубин с локализацией объектов на них и формирования маршрутов передвижения роботизированных комплексов, а также позволяющих повысить быстродействие адаптивных нейро-нечетких систем вывода. В первой главе представлена технология создания системы технического зрения для роботизированного комплекса, включающая 8 этапов и критерии оценки её эффективности.

Для решения научной проблемы, рассмотренной в первой главе, во второй главе диссертационного исследования разработан математический инструментальный методологии синтеза интеллектуальных систем технического зрения для роботизированных комплексов.

Во второй главе разработаны нейро-нечеткая система вывода, основанная на предложенном в диссертации методе отношения площадей,

используемая для вычисления диспаратета на картах глубин; модель нечёткой фильтрации, модель оптимизации числа проходов при обработке изображений, позволяющие повысить производительность наиболее сложных вычислительных операций при фильтрации изображений и вычислении суммы абсолютной разности.

Объединение вышеуказанных моделей в единую методологию синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейро-нечётких систем технического зрения описано в третьей главе.

В третьей главе диссертации разработаны модели визуализации пространственного положения роботизированного комплекса.

Учитывая созданный во второй и третьей главах диссертационного исследования математический аппарат, разработана методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейро-нечётких систем технического зрения на основе мягких вычислений, предназначенная для роботизированных комплексов, использующих в качестве органов осязания стереокамеры.

В четвертой главе представлена реализация нейро-нечётких моделей на основе параллельно-конвейерной обработки информации, и анализ их программно-имитационных моделей.

С целью повышения быстродействия обработки информации в системе технического зрения в четвертой главе предложены решения для распараллеливания вычислительных процедур, использующихся при интеллектуализации процесса построения трехмерных сцен по вычисленным картам глубин.

Пятая глава посвящена анализу экспериментальных данных, полученных при обработке стереоинформации на основе нейро-нечёткой системы вывода, основанной на методе отношения площадей, и оценке их быстродействия.

В заключении диссертации содержатся основные выводы и предложения, обобщающие результаты выполненного исследования, которые отражают достижение основной цели работы на основе решения актуальной проблемы диссертационного исследования.

Текст автореферата полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

Материал диссертации изложен ясно, логично и аргументировано, хорошо иллюстрирован и структурирован. Работа написана грамотным техническим языком на высоком научном уровне. Существенных замечаний к стилю изложения и качеству оформления диссертации и автореферата нет.

### **Достоверность и новизна полученных результатов**

Анализ диссертационной работы Милостной Н.А. позволяет сделать вывод о том, что автором решен широкий круг задач, имеющих научную и практическую ценность, получен ряд новых, оригинальных результатов, имеющих существенное значение для повышения быстродействия вычислительного процесса обработки стереоизображений в нейро-нечётких

системах технического зрения.

В диссертационной работе Милостной Н.А. представлены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

1. Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейро-нечётких систем технического зрения, включающая в себя метод отношения площадей, метод построения адаптивной нейро-нечёткой системы вывода, модель нечёткой фильтрации сигналов, модель оптимизации числа проходов при обработке изображений свёрточной матрицей  $3 \times 3$ , математическую модель распознавания цветowych меток, интеллектуальную математическую модель построения карт глубин и модифицированный алгоритм поиска кратчайшего пути  $A^*$ , позволяющих в режиме реального времени детектировать объекты, находящиеся на пути движения роботизированного комплекса, и формировать траектории их обхода.

2. Метод отношения площадей, отличающийся исключением ошибки, связанной с сужением интервала дефаззификации в нечётком выводе, позволяющий сократить время вычислительного процесса на несколько порядков по сравнению с аналогами.

3. Быстродействующие дефаззификаторы, отличающиеся применением метода отношения площадей, позволяющие сократить время вычисления результирующего значения на выходе дефаззификатора за счёт исключения из расчёта времени, необходимого для определения ширины верхнего основания усечённого терма выходной функции принадлежности (до 40 нс в первой модификации) и за счёт исключения вычисления двух переменных: ширины терма выходной функции принадлежности и ширины верхнего основания усечённого терма выходной функции принадлежности (до 32,5 нс во второй модификации).

4. Метод построения адаптивной нейро-нечёткой системы вывода, отличающийся использованием мягких вычислений при композиции нечётких правил, модификацией дефаззификации методом отношения площадей и применением метода градиентного спуска при обучении, позволяющий повысить точность её обучения более чем в 11 раз по сравнению с классической адаптивной нейро-нечёткой системой вывода Такаги-Сугэно.

5. Математическая модель нечёткой фильтрации сигналов, основанная на методе отношения площадей, позволяющая исключить расчёт настроечных коэффициентов, свойственных классическому и нечёткому фильтрам Калмана, обеспечивающая адаптацию её параметров к изменениям параметров окружающей среды за счёт автоматической настройки меток входных функций принадлежности, имеющая преимущество по точности при использовании второй быстродействующей модификации метода отношения площадей на 39% по отношению к фильтру Калмана и на 34% по отношению к нечёткому фильтру Калмана.

6. Модель оптимизации числа проходов при обработке изображений свёрточной матрицей с окном  $3 \times 3$ , основанная на известном методе акселерации с использованием интегрального изображения, отличающаяся наличием обратного прохода на основе сформулированной теоремы об

эквивалентности расчёта суммы элементов в окне  $3 \times 3$  с представлением её доказательства, позволяющая снижением вычислительной сложности алгоритма при определении суммы элементов в окне, как минимум, в два раза снизить время при обработке изображения окном  $3 \times 3$  по сравнению с прямым методом свёртки, использующим единичный фильтр.

7. Математическая модель распознавания цветowych меток, позволяющая определить пространственное трёхмерное положение исполнительных механизмов роботизированного комплекса с помощью одной видеокамеры, увеличивающая точность распознавания цветowych меток на 12% по отношению к существующим аналогам и используемая для построения маршрута передвижения исполнительных механизмов роботизированных комплексов, обеспечивающая в 1,38 раза увеличение производительности технологического процесса складирования изделий по сравнению с существующими решениями.

8. Математическая модель построения карт глубин, отличающаяся использованием для вычисления диспарантности трёхуровневой нейро-нечёткой системы вывода, использующей метод детектирования границ объектов на первом уровне, особенностью реализации второго и третьего уровней которой является использование одинаковых функций принадлежности и базы нечётких правил, что позволяет уменьшить количество вычислительных операций за счёт использования одних и тех же блоков при программной реализации данной системы в параллельно-конвейерных устройствах, обеспечивающая повышение точности при построении карт глубин не менее чем в 1,5 раза по отношению к известным решениям.

9. Вектор целевых критериев, позволяющих оценить качество функционирования высокопроизводительной нейро-нечёткой системы технического зрения, основанной на интеллектуальных моделях распознавания цветowych меток и построения карт глубин.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается использованием принятых подходов к оценке качества методов и алгоритмов обработки стереоинформации.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, подтверждается экспертизой 25 статей в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ по специальности диссертации, 13 публикациями в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science (из них 3 статьи в журналах квартиля Q1), а также широким обсуждением и положительной апробацией результатов диссертационной работы на научных симпозиумах, конференциях.

Объем и содержание публикаций отражает основные защищаемые положения диссертации.

Совокупность реализационных основ и принципиально новых технических результатов показывает, что работа Милостной Н.А. является законченной научно-квалификационной работой, вносящей существенный вклад в теорию синтеза высокопроизводительных нейро-нечетких систем

технического зрения, позволяющих обеспечить увеличение быстродействия обработки стереоинформации в нейро-нечётких моделях при соблюдении требуемой точности вычислений.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов диссертации подтверждается правильным применением методов исследования диссертационной работы: системный анализ, теория искусственного интеллекта и автоматического управления, методы нечеткой логики и нечетких множеств, нейро-нечетких сетей, матричной алгебры, методы теории вероятности и корреляционно-регрессионного анализа, вычислительной математики и математической статистики. Адекватность и достоверность предложенных методов и алгоритмов подтверждается результатами компьютерного моделирования и экспериментами с реальными данными.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

В диссертации представлены результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в разработке новых методов, моделей, алгоритмов и подходов, которые при соблюдении требуемой точности вычислений повышают быстродействие обработки стереоинформации в системах технического зрения. Совокупность разработанных методов, моделей, алгоритмов, позволяющих в режиме реального времени детектировать объекты, находящиеся на пути движения роботизированного комплекса, и формировать траектории их обхода, составляет предложенную автором методологию синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейро-нечётких систем технического зрения. Разработанная методология позволяет преодолеть недостатки известных нейро-нечётких систем технического зрения и повысить быстродействие новой системы технического зрения в 7.7 раза по сравнению с ними.

Практическая ценность результатов диссертационной работы подтверждается тем, что в период подготовки диссертации соискателем разработаны технические решения, оригинальность которых подтверждается экспертизой объектов интеллектуальной собственности (Роспатент).

Практическая значимость научного исследования подтверждена тем, что результаты работы в экспериментальном порядке прошли апробацию на производственных предприятиях: АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова», Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт морского транспорта «НовоморНИИпроект» (г. Новороссийск), ООО «Софт-Кристалл» (г. Томск), ОАО «Курскмедстекло», Научно-исследовательский центр (г. Курск) ФГУП «18 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации. Внедрение результатов диссертационной работы в производственные системы этих предприятий

вносит значительный вклад в развитие страны.

Следует также отметить, что научно-методические результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в образовательные процессы Юго-Западного государственного университета, Воронежского государственного технического университета, Брянского государственного технического университета, Академии государственной противопожарной службы МЧС России.

Значимость результатов научных исследований, проведенных в диссертационной работе, также подтверждается поддержкой со стороны Российского научного фонда, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственные задания).

### **Замечания по диссертационной работе**

Замечания по диссертационной работе и автореферату заключаются в следующем.

1. В первой и второй главах диссертации приводятся ссылки на таблицы из четвертой и пятой глав диссертации, что не соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 к оформлению диссертации, так как таблицы размещаются под текстом, в котором впервые дана ссылка на них, или на следующей странице.

2. Значение весового коэффициента при обучении нейро-нечеткой сети (глава 2, рисунок 2.7, переменная  $w$ ) можно было бы представить в формате с плавающей запятой, например,  $3 \times 10^{+55}$ .

3. При описании критериев для оценки точности работы системы не учтено возникновение ошибок первого рода.

4. Экспериментальная оценка и проверка алгоритмического обеспечения робототехнического комплекса с интеллектуальной высокопроизводительной нейро-нечёткой системой технического зрения выполнялась только для мехатронного комплекса, предназначенного для сортировки готовых изделий, в то время как существует и другие робототехнические комплексы, на которых может быть осуществлен аналогичный контроль математической модели распознавания цветных меток.

5. В работе не в полном объеме представлены методики настройки алгоритмического обеспечения и практические рекомендации по использованию интеллектуального мехатронного комплекса с разработанной нейро-нечёткой системой технического зрения.

Указанные замечания не снижают ценности проведенных автором исследований и работы в целом, могут быть приняты во внимание в качестве рекомендаций по дальнейшему развитию данного научного исследования.

### **Заключение**

Диссертационная работа Милостной Натальи Анатольевны «Методология синтеза интеллектуальных высокопроизводительных нейро-нечётких систем технического зрения», представленная по специальности

