

На правах рукописи



Беляков Павел Викторович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ
СЦЕНЫ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Специальность 05.13.17 – «Теоретические основы информатики»
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пенза 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (РГРТУ) на кафедре «Электронные вычислительные машины»

Научный руководитель **Никифоров Михаил Борисович**,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электронные вычислительные
машины» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Официальные
оппоненты: **Потехин Дмитрий Станиславович**,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры вычислительной техники ФГБОУ
ВО «МИРЭА - Российский технологический
университет»

Юдин Дмитрий Александрович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
когнитивных динамических систем ФГАОУ ВО
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Ведущая
организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева–КАИ», г. Казань

Защита диссертации состоится 26 декабря 2019 г., в 13 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 в ФГБОУ ВО "Пензенский государственный технологический университет" по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» и на сайте www.penzgtu.ru..

Автореферат разослан «__»_____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время неуклонно растет потребность в цифровом представлении объектов и сцен реального мира. Так, например, 3D-печать становится все более доступной для изготовления отдельных деталей. Не менее важной и актуальной является проблема пространственной реконструкции в системах технического зрения летательных аппаратов (ЛА) и робототехнических комплексов. В частности, отображение на экране информационно-управляющего поля кабины пространственной модели закабинного пространства значительно облегчает полеты и посадку вертолета в сложном рельефе, что существенно повышает безопасность эксплуатации ЛА. Развитие дополненной реальности также требует знаний о геометрии объектов реального мира и окружающей сцены.

Несмотря на развитие устройств на основе активных методов трехмерной реконструкции, например лазерных сканеров и времяпролетных камер, стандартные цифровые камеры по-прежнему остаются основным устройством получения изображения в качестве отправной точки пространственной реконструкции. В качестве входных данных требуется последовательность изображений статической сцены, полученных при движении камеры с неизвестным положением по непрерывной траектории. Предполагаются известными лишь внутренние параметры камеры. Корректная оценка положения камеры чрезвычайно важна для построения трехмерной структуры.

Традиционные алгоритмы пространственной реконструкции полагаются на разреженные признаки изображений. Такие методы должны тщательно отбирать наиболее подходящие признаки и устранять неустойчивые - выбросы. Целью подходов, основанных на поиске и сопоставлении таких признаков, является оценка по ним фундаментальной матрицы - базового геометрического отношения, лежащего в основе взаимосвязи двух изображений одной и той же сцены. Это отношение выражается эппиполлярным ограничением, которое задает взаимное положение соответствующих точек двух изображений так, чтобы эти точки находились на определенных эппиполлярных линиях, а не где-нибудь произвольно в плоскости изображения, что в конечном итоге и позволяет определить пространственную структуру сцены. С другой стороны, методы плотного оптического потока за последнее время достигли определенных успехов и могут успешно применяться в задачах пространственной реконструкции по изображениям от камер. Такие методы обеспечивают очень большое количество сопоставлений для вычисления фундаментальной матрицы и гарантируют небольшое количество выбросов.

С учетом сказанного целесообразно разработать метод пространственной реконструкции по последовательности изображений, который основан на плотном методе сопоставления изображений – оптическом потоке, но с учетом ограничений эппиполлярной геометрии.

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие научных исследований в этой области внесли отечественные ученые Визильтер Ю.В., Волегов Д.Б., Кузнецов П.К., Новиков А.И., Юрин Д.В., Чочия П.А. и другие, а также зарубежные ученые Брокс Т., Брюн А., Вальгаретс Л., Вейкерт И., Зелицки Р., Хартли Р., Хорн Б., Циссерман А. и другие. Несмотря на большое количество публикаций по данной тематике, в результате их анализа не было выявлено работ, в которых в полной мере исследуется и решается задача пространственной реконструкции вариационным методом в реальном времени. К тому же не существует универсального алгоритма, который для всех областей применения обеспечивает требуемую эффективность. Главным недостатком известных методов и алгоритмов является вычислительная сложность реконструкции в реальном времени с необходимой субпиксельной степенью точности.

В данной диссертационной работе автором исследуются и развиваются вариационный метод пространственной реконструкции и связанные с ним алгоритмы. Приводится сравнительный анализ предлагаемых методов и алгоритмов с известными.

Цель диссертации состоит в повышении точности реконструкции пространственных сцен технической и естественной природы в реальном масштабе времени по двум изображениям путем совершенствования методов и алгоритмов реконструкции.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

- обзор и оценка существующих методов пространственной реконструкции сцены;
- модернизация метода пространственной реконструкции сцены, заключающаяся в совместном вычислении функционала оптического потока и фундаментальной матрицы в единой вычислительной процедуре с одновременным определением пространственных координат точек сцены, обеспечивающая повышенную точность реконструкции;
- разработка методики регуляризации совместного функционала для минимизации площади поверхности реконструируемой сцены с целью дополнительного повышения точности реконструкции;
- разработка алгоритма аппроксимации реконструируемой сцены для обеспечения гладкости реконструируемой поверхности;
- создание алгоритма распараллеливания вычисления оптического потока вариационным методом с целью ускорения вычислительного процесса;
- разработка программно-аппаратного стенда для экспериментального исследования методов пространственной реконструкции сцены.

Научная новизна диссертации заключается в создании новых эффективных метода, методики и алгоритмов пространственной реконструкции сцены в системах обработки изображений:

- разработан метод совместного вычисления функционала оптического потока и фундаментальной матрицы, отличающийся одновременным определением пространственных координат точек сцены, обеспечивающий повышение точности реконструкции пространственной модели сцены в реальном времени на 15 – 20 %;
- разработана методика регуляризации совместного функционала, отличающаяся возможностью минимизации площади реконструируемой сцены, что дает возможность дополнительно повысить точность реконструкции на 5 – 7 %;
- созданы алгоритмы реконструкции сцены, включающие процедуры аппроксимации и распараллеливания вычисления оптического потока, обеспечивающие гладкость реконструируемой поверхности и сокращение продолжительности вычислительного процесса.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы вычислительной математики, теории обработки изображений и распознавания образов, теории планирования экспериментов, математического моделирования, системного анализа, вариационное исчисление и методы оптимизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) метод совместного вычисления функционала оптического потока и фундаментальной матрицы с одновременным определением пространственных координат точек сцены, обеспечивающий повышение точности реконструкции пространственной модели сцены в реальном времени на 15 – 20 %;
- 2) методика регуляризации совместного функционала для минимизации площади реконструируемой сцены, обеспечивающая дополнительное повышение точности реконструкции на 5 – 7 %;
- 3) алгоритм аппроксимации реконструируемой сцены для обеспечения гладкости реконструируемой поверхности;
- 4) алгоритм распараллеливания вычисления оптического потока вариационным методом, обеспечивающий ускорение вычислительного процесса.

Практическая значимость работы состоит в том, что применение разработанных методов и алгоритмов позволяет создать аппаратно-программные средства, обеспечивающие повышенную точность пространственной реконструкции сцены в реальном времени при решении задач реконструкции объекта-оригинала технической и естественной природы.

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена на кафедре ЭВМ ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина». Результаты диссертационной работы и разработанный программно-аппаратный стенд внедрены в Научно-конструкторском центре видеокomпьютерных технологий (НКЦ ВКТ) ФГУП «Государственный Рязанский приборный завод» в виде алгоритмов, реализующих технологию построения пространственной модели окружающей обстановки в авиационных системах технического зрения; в ЗАО «НЕЙРОКОМ» (г. Москва) в виде алгоритмов реконструкции лица водителя

автомобиля; в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» при изучении дисциплины «Системы технического зрения».

Результаты диссертации также были использованы при выполнении хоздоговорной научно-исследовательской работы, проводимой на кафедре ЭВМ РГРТУ: «Разработка и исследование программно-математического и аппаратного обеспечения датчика оси диаграммы направленности системы беспроводной оптической связи». Шифр: «ДОДН - РГРТУ-2018». Заказчик: ЗАО «Мостком», г. Рязань.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались:

- на 8-й Средиземноморской конференции по встроенным вычислениям (Черногория, Будва, 2019 г.);
- 16-м Международном научно-техническом симпозиуме «East-West Design & Test Symposium» (Казань, 2018 г.);
- Международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2016 (Рязань, 2016 г.);
- 28-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-28 (Саратов, 2015 г.);
- 23-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2018)» (Рязань, 2018 г.);
- 31-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы (Биомедсистемы-2018)» (Рязань, 2018 г.);
- 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2017 г.);
- 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них шесть – в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки, три – в изданиях, индексированных в наукометрических базах *Scopus* и *Web of Science*.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.17 в части пунктов:

п. 5 Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечениях, разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений;

п. 7 Разработка методов распознавания образов, фильтрации, распознавания и синтеза изображений, решающих правил. Моделирование формирования эмпирического знания.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Основной текст работы содержит 152 страницы, 55 рисунков и 6 таблиц. Список использованных источников включает 164 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе рассмотрены основные способы построения пространственной модели. Несмотря на достижения в развитии технических средств трехмерной реконструкции, например лазерных сканеров и времяпролетных камер, стандартные цифровые камеры по-прежнему остаются самыми доступными устройствами для пространственной реконструкции сцены по получаемым с них изображениям.

В основе методов реконструкции по изображениям лежат поиск и сопоставление разреженных особенностей на изображении, по которым составляется фундаментальная матрица. Матрица определяет эпиполярную геометрию сцены, которая задает взаимное положение соответствующих точек двух изображений так, чтобы эти точки находились на определенных эпиполярных линиях в плоскости изображения.

Под извлечением точки интереса понимают определение ее местоположения на изображении с отличительной информацией об ее окрестности. Классическими примерами характерных признаков изображений являются ребра и углы. Соответствие этим признакам обычно устанавливается путем сопоставления разреженного набора дескрипторов признаков изображения, вычисленных, например, методами SIFT или SURF. В результате получается набор отличительных признаков изображения, которые могут быть идентифицированы по образцам с высокой вероятностью посредством поиска ближайшего соседа в дескрипторном пространстве.

Теоретически для вычисления фундаментальной матрицы достаточно восьми точных совпадений. Однако на практике установление соответствий признаков подвержено рискам ошибки, поскольку существующие алгоритмы сопоставления признаков грешат ошибками локализации и ложными совпадениями. Это обусловило разработку множества методов, основанных на вычислении эпиполярной геометрии и сильно зависящих от качества выборки особенностей.

Что касается точности сопоставления двух изображений, исследования в области вычисления оптического потока показали, что вариационные методы являются хорошей альтернативой методам оценки фундаментальной матрицы на основе признаков. Такой подход обещает, по меньшей мере, два преимущества по сравнению с подходами на основе признаков: плотный оптический поток

обеспечивает очень большое количество сопоставлений и гарантирует небольшое количество выбросов.

Вариационные методы вычисления оптического потока минимизируют функционал, который моделирует временное постоянство свойств изображения. Минимизация вариационных методов оптического потока обычно производится с помощью метода градиентного спуска или численного решения уравнений Эйлера–Лагранжа.

Ввиду изложенного методы оптического потока для оценки эпполярной геометрии представляются перспективными. Кроме того, знание эпполярной геометрии объекта может оказывать стабилизирующее влияние на вычисление оптического потока.

С учетом сказанного целесообразно разработать метод пространственной реконструкции по последовательности изображений, который основан на плотном методе сопоставления изображений – оптическом потоке, но с учетом ограничений эпполярной геометрии. Чтобы использовать оптический поток, фундаментальную матрицу и пространственную структуру в их сочетании, в данной работе предлагается расширить одну из наиболее точных, но вместе с тем и наиболее сложных моделей вычисления оптического потока в вариационной формулировке, а поиск решения проводить посредством минимизации функционала.

Во второй главе предлагается “вариационный метод пространственной реконструкции сцены”, заключающийся в том, что в нем производится пространственная реконструкция сцены по паре изображений на основе плотного метода сопоставления изображений – оптическом потоке, но с учетом ограничений эпполярной геометрии.

В методе производится минимизация совместного функционала для всех неизвестных - оптического потока и фундаментальной матрицы, с одновременным определением пространственных координат точек сцены без прямого вычисления карты глубины. Такой способ минимизации совместного функционала в специально разработанной для этого одной общей вычислительной процедуре обеспечивает более высокую точность вычисления влияющих друг на друга неизвестных и соответственно более качественное построение пространственной модели.

В разработанном методе эпполярная геометрия используется как мягкое ограничение пространства поиска соответствий на изображениях. Тем самым придается определенная гибкость поиску соответствий на изображениях вместо строгого следования эпполярным линиям.

Обобщенная вариационная модель вычисления пространственной структуры сцены строится на базе функционала оптического потока с дополнительным эпполярным ограничением и одновременным определением пространственных координат сцены:

$$\begin{aligned}
E(\mathbf{w}, \mathbf{f}, \mathbf{X}) = & \int_{\Omega} (\psi(|I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - I(\mathbf{x})|^2 + \gamma |\nabla I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - \nabla I(\mathbf{x})|^2) + \\
& + \alpha \psi(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2)) d\mathbf{x} + \\
& + \beta \int_{\Omega} \psi((\mathbf{s}^T \mathbf{f})^2) d\mathbf{x} + \int_{\Omega} S(\mathbf{X}) d\mathbf{x},
\end{aligned} \tag{1}$$

здесь $I(x, y, t) : \Omega \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^2$ – последовательность изображений, $\mathbf{x} = (x, y, 1)^T$ – координаты пикселя внутри прямоугольной области изображения $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ в момент времени $t \geq 0$, оптический поток $\mathbf{w} = (u, v, 1)^T$ – искомый вектор смещения между пикселями двух изображений в момент времени t и момент времени $t+1$, $\nabla = (\partial_x, \partial_y)^T$ – символический вектор набла – пространственный градиент, γ – коэффициент, позволяющий управлять вкладом в функционал (1) изменения яркости и градиента яркости, $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, описывает то, насколько важно требование гладкости полученного вектора смещений.

Первое слагаемое в (1) – терм данных, определяет постоянство яркости и градиента яркости пикселей при смещении изображения. Второе слагаемое в выражении (1) – терм гладкости вектора смещения, накладывает ограничения в виде функции штрафа на резкое изменение вектора смещения. Функция штрафа $\psi(s^2) = \sqrt{s^2 + \varepsilon^2}$ определяет устойчивость минимизации функционала к изменениям яркости изображения и гладкости поля. Третье слагаемое в (1) определяет вычисление фундаментальной матрицы. Для устойчивости ее вычисления используется нелинейная функция штрафа, аналогичная функции штрафа при вычислении оптического потока.

В эпиполярной геометрии $\tilde{\mathbf{x}} = (x, y, 1)^T$ – проективные координаты признаков на левом изображении, $\tilde{\mathbf{x}}' = (x', y', 1)^T$ – проективные координаты на правом. Тогда связь между признаками двух изображений определяется эпиполярным ограничением:

$$0 = \tilde{\mathbf{x}}'^T F \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{s}^T \mathbf{f}, \tag{2}$$

где $\mathbf{s} = (xx', yx', x', xy', yy', y', x, y, 1)^T$, F – фундаментальная матрица размером 3×3 , а $\mathbf{f} = (f_{1,1}, f_{1,2}, f_{1,3}, f_{2,1}, f_{2,2}, f_{2,3}, f_{3,1}, f_{3,2}, f_{3,3})^T$ – векторная форма фундаментальной матрицы с компонентами вектора $f_{i,j}$, где $1 \leq i, j \leq 3$. Для решения уравнения (2) в общем случае достаточно координат 8 точек, но в совместном функционале учитываются соответственно все точки изображения.

Совместный функционал (1) с учетом ограничения $\|\mathbf{f}\|^2 = 1$ может быть минимизирован методом множителей Лагранжа:

$$L(\mathbf{w}, \mathbf{f}, \lambda) = E(\mathbf{w}, \mathbf{f}) + \lambda(1 - \mathbf{f}^T \mathbf{f}), \quad (3)$$

для которого ищется $(u^*, v^*, \mathbf{f}^*, \lambda^*)$ – вектор оптимальных значений, удовлетворяющий уравнениям Эйлера – Лагранжа.

Для минимизации (3) относительно вектора оптического потока (u, v) уравнения Эйлера-Лагранжа примут вид :

$$\frac{\partial}{\partial u} L(\mathbf{w}, \mathbf{f}, \lambda) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial v} L(\mathbf{w}, \mathbf{f}, \lambda) = 0. \quad (4)$$

Эпиполярное ограничение может быть записано в виде $\mathbf{s}^T \mathbf{f} = au + bv + q$, где эпиполярная линия $F\tilde{\mathbf{x}}$ в точке $\tilde{\mathbf{x}} = (x, y, 1)^T$ на левом изображении будет иметь коэффициенты $a = (F\tilde{\mathbf{x}})_1$ и $b = (F\tilde{\mathbf{x}})_2$. А q может рассматриваться как расстояние точки $\tilde{\mathbf{x}}$ до этой эпиполярной линии с точностью до множителя.

Частные производные по (u, v) обобщенного функционала (1) примут вид

$$\begin{aligned} 0 &= \psi'(I_z^2 + \gamma(I_{xz}^2 + I_{yz}^2))(I_x I_z + \gamma(I_{xx} I_{xz} + I_{xy} I_{yz})) - \alpha \operatorname{div}(\psi'(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2) \nabla u) + \\ &+ \beta \psi'((\mathbf{s}^T \mathbf{f})^2)(a^2 u + abv + aq), \\ 0 &= \psi'(I_z^2 + \gamma(I_{xz}^2 + I_{yz}^2))(I_y I_z + \gamma(I_{yy} I_{yz} + I_{xy} I_{xz})) - \alpha \operatorname{div}(\psi'(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2) \nabla v) + \\ &+ \beta \psi'((\mathbf{s}^T \mathbf{f})^2)(b^2 v + abu + bq), \end{aligned} \quad (5)$$

где $I_* = \partial_* I(\mathbf{x} + \mathbf{w})$, $I_z = I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - I(\mathbf{x})$, $I_{*z} = \partial_* I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - \partial_* I(\mathbf{x})$,

* означает частные производные по x, y, xx, xy, yy соответственно,

$$|\nabla u|^2 = u_x^2 + u_y^2, \quad |\nabla v|^2 = v_x^2 + v_y^2, \quad u_x = \frac{\partial u}{\partial x}, u_y = \frac{\partial u}{\partial y}, v_x = \frac{\partial v}{\partial x}, v_y = \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Линеаризация нелинейных дифференциальных уравнений приводит к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые могут быть численно решены итерационным методом.

Для подзадачи минимизации (3) относительно фундаментальной матрицы F приравниваем производные $F(\mathbf{f}, \lambda)$ по $\mathbf{f}$ и λ к нулю. В результате уравнения Эйлера – Лагранжа примут вид

$$\nabla_{\mathbf{f}} L(\mathbf{w}, \mathbf{f}, \lambda) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial}{\partial \lambda} L(\mathbf{w}, \mathbf{f}, \lambda) = 0, \quad (6)$$

где $\nabla_{\mathbf{f}}$ – градиент $(\partial_{f_{1,1}}, \dots, \partial_{f_{3,3}})^T$. Таким образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &= \left(\int_{\Omega} \psi'((\mathbf{s}^T \mathbf{f})^2) \mathbf{s}^T dx dy - \lambda I \right) \mathbf{f} := (M - \lambda I) \mathbf{f}, \\ \mathbf{0} &= 1 - \|\mathbf{f}\|^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где M – симметричная матрица с весами $m_{i,j} = \int_{\Omega} \psi'((\mathbf{s}^T \mathbf{f})^2) s_i s_j dx dy$, $1 \leq i, j \leq 9$, а s_i – элемент вектора $\mathbf{s}$. Вычисление весов $m_{i,j}$ требует оценки фундаментальной матрицы и наоборот.

Система уравнений (4) и (6) решается итерационно, поочередно выполняется вычисление оптического потока и фундаментальной матрицы. Сначала решаются уравнения Эйлера – Лагранжа (5) относительно вектора оптического потока $\mathbf{w}$ при фиксированном векторе $\mathbf{f}$ фундаментальной матрицы. Затем с использованием оптического потока формируется матрица M уравнений (7) и решается задача на собственные значения матрицы. Из-за ограничения $\mathbf{0} = 1 - \|\mathbf{f}\|^2$ решение всегда будет иметь единичную норму. Новая оценка фундаментальной матрицы, в свою очередь, будет использоваться для повторного решения уравнений Эйлера – Лагранжа для оптического потока. Этот процесс повторяется до сходимости.

Пространственное положение точки $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$ для каждого $\mathbf{x} = (x, y)$ минимизирует функционал (1) в части слагаемых $S(\mathbf{X})$, что в итоге непосредственно и определяет реконструируемую поверхность.

Пространственные координаты каждой точки $\mathbf{x}$ заданы как $\mathbf{X} \in S$, где $S \subset \mathbb{R}^3$ – реконструируемая поверхность. Связь между точками двух изображений с учетом матрицы K внутренних параметров камеры определяется эпиполярным ограничением $\mathbf{x}^T E \mathbf{x} = 0$, где $E = K^T F K$ – существенная матрица. Матрица вращения R и вектор положения $\mathbf{t}$ камеры могут быть получены с помощью сингулярного разложения (SVD) матрицы E . В функционале (1) терм данных $S(\mathbf{X})$ неявно использует эпиполярную геометрию и связывает трехмерные точки и оптический поток через матрицу проекции камеры $P = K[R | \mathbf{t}]$. Оптический поток $\mathbf{w}$ устанавливает плотное соответствие $\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{w}$, поэтому слагаемое пространственной структуры в (1) можно в итоге выразить через сумму ошибок репроекции:

$$S(\mathbf{X}) = \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{x} \mathbf{p}_0^3 - \mathbf{p}_0^1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{y} \mathbf{p}_0^3 - \mathbf{p}_0^2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} \right\|^2 + \\ + \left\| \begin{bmatrix} (x+u) \mathbf{p}^3 - \mathbf{p}^1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} \right\|^2 + \left\| \begin{bmatrix} (y+v) \mathbf{p}^3 - \mathbf{p}^2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ 1 \end{bmatrix} \right\|^2. \quad (8)$$

Минимизируется расстояние d между проекцией пространственной координаты $\mathbf{X}$ и координатой $\mathbf{x}$ через матрицы камеры P и P_0 . $P_0 = K[\mathbf{I} | \mathbf{0}]$ – матрица положения камеры для изображения I_1 , определяемая через нулевой вектор сдвига $\mathbf{0}$ с единичной матрицей поворота $\mathbf{I}$.

Пространственные координаты $\mathbf{X}$ могут быть вычислены путем минимизации (8), что приводит к системе линейных алгебраических уравнений, которая решается методом наименьших квадратов.

Если $(u^*, v^*, \mathbf{f}^*, \mathbf{X}^*)$ – решение задачи минимизации (1), то оно удовлетворяет уравнениям Эйлера – Лагранжа. Однако функции, удовлетворяющие данным уравнениям, не обязательно гарантируют глобальный минимум функционалу. В силу нелинейности функционал может иметь множество локальных минимумов. Чтобы обойти это препятствие, используют метод последовательных приближений и пирамиду изображений.

Разработанный метод построения пространственной структуры сцены по изображениям повышает, как показывают результаты экспериментальных исследований, приведённые в четвертой главе, точность реконструкции поверхности примерно на 15–20%. Повышение точности достигается за счет минимизации обобщенного функционала оптического потока и фундаментальной матрицы с непосредственным определением трехмерных координат точек сцены.

В третьей главе разработана методика “регуляризации поверхности”, которая заключается в том, что вариационный метод построения пространственной модели, разработанный в предыдущей главе, дополняется требованием минимальной площади поверхности реконструируемой сцены. Основные положения методики можно определить следующим образом:

1. Обобщённый функционал вычисления пространственной структуры можно записать как

$$\begin{aligned} E(\mathbf{w}, \mathbf{f}, \mathbf{X}) = & \int_{\Omega} (\psi(|I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - I(\mathbf{x})|^2 + \gamma |\nabla I(\mathbf{x} + \mathbf{w}) - \nabla I(\mathbf{x})|^2)) d\mathbf{x} + \\ & + \alpha \int_{\Omega} \psi(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2) d\mathbf{x} + \\ & + \beta \int_{\Omega} \psi((\mathbf{s}^T \mathbf{f})^2) d\mathbf{x} + \int_{\Omega} S_G(\mathbf{X}) d\mathbf{x} + \lambda_S \int_{\Omega} S_S(\mathbf{X}) d\mathbf{x}. \end{aligned} \quad (9)$$

В функционале (9) ограничение $S(\mathbf{X}) = S_G(\mathbf{X}) + \lambda S_S(\mathbf{X})$ состоит, как и ранее в (1), из слагаемого $S_G(\mathbf{X})$, непосредственно определяющего поверхность, и нового слагаемого $S_S(\mathbf{X})$ пространственной регуляризации поверхности, отвечающего за требование минимальной площади поверхности реконструируемой сцены и приводящего к глобальной гладкости реконструируемой поверхности. Параметр λ_S соответствует силе регуляризации, которая задается в процессе реконструкции.

Регуляризация минимальной площади поверхности представлена на рисунке 1. Для заданной поверхности S , параметризованной областью изображения Ω , тангенциальные векторы $\mathbf{X}_X$, $\mathbf{X}_Y$ бесконечно малой поверхности dS в точке $\mathbf{X}$ могут быть определены с помощью частных производных вектора $\mathbf{X}$ по

координатам x и y . Бесконечно малая область dA на реконструируемой поверхности S в точке $\mathbf{X}$ будет определяться на параметризуемой области Ω как

$$dA = \sqrt{\det \mathbf{I}_p} d\mathbf{x}, \quad (10)$$

где $\mathbf{I}_p$ - метрический тензор, определяемый как

$$\mathbf{I}_p = \begin{pmatrix} \langle \mathbf{X}_x, \mathbf{X}_x \rangle & \langle \mathbf{X}_x, \mathbf{X}_y \rangle \\ \langle \mathbf{X}_y, \mathbf{X}_x \rangle & \langle \mathbf{X}_y, \mathbf{X}_y \rangle \end{pmatrix}.$$

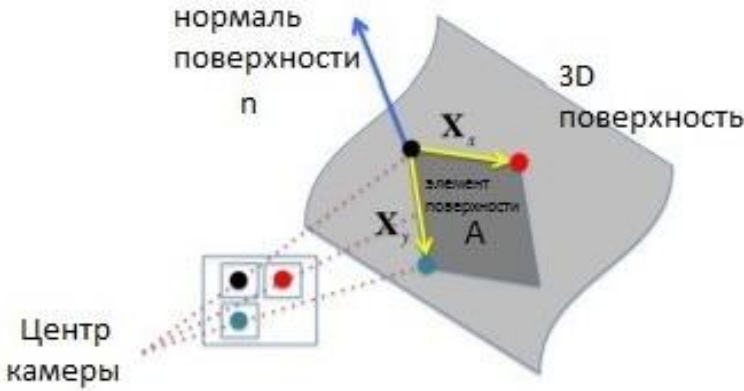


Рисунок 1 – Регуляризация минимальной площади поверхности

Таким образом целью является минимизация общей площади реконструируемой поверхности, что достигается интегрированием (10) по всему изображению.

2. Решение эквивалентно минимизации длины нормали к поверхности $\|\mathbf{n}\| = \|\mathbf{X}_x \times \mathbf{X}_y\|$. Здесь векторное произведение можно определить, выразив частные производные $\mathbf{X}$ в простой координатной форме: $\mathbf{X}_x = (X_x, Y_x, Z_x)$, $\mathbf{X}_y = (X_y, Y_y, Z_y)$, а $X_x = (X_{i,j} - X_{i-1,j})$, $Y_x = (Y_{i,j} - Y_{i-1,j})$, $Z_x = (Z_{i,j} - Z_{i-1,j})$, $X_y = (X_{i,j} - X_{i,j-1})$, $Y_y = (Y_{i,j} - Y_{i,j-1})$, $Z_y = (Z_{i,j} - Z_{i,j-1})$. $\mathbf{X} = (X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j})$ - пространственные координаты точки сцены, (i, j) - регулярная сетка плоскости изображения.

3. Слагаемое регуляризации минимальной поверхности, аналогично функции регуляризации оптического потока вычисляется как

$$S_S(\mathbf{X}) = \lambda_s \sqrt{(Y_x Z_y - Z_x Y_y)^2 + (Z_x X_y - X_x Z_y)^2 + (X_x Y_y - Y_x X_y)^2}. \quad (11)$$

Приравнивая частные производные к нулю, записывают уравнения Эйлера–Лагранжа минимизации функционала (9) для слагаемого пространственной регуляризации (11), что приводит в итоге к системе линейных алгебраических уравнений, которая решается методом наименьших квадратов.

Разработанный метод пространственной реконструкции с дополнительным регуляризирующим фактором, предъявляющим требование минимальной площади поверхности к реконструируемой геометрии сцены, приводит к глобальной гладкости поверхности, что на некоторых типах сцен дополнительно приводит к повышению точности на 5–7 %.

4. Альтернативой глобального подхода (пункты 1-3 предлагаемой методики) при ограниченных вычислительных ресурсах предлагается подход, который использует априорное знание о форме поверхности, способствующее локальной гладкости реконструируемой поверхности.

5. В этом случае аппроксимация реконструируемой сцены проводится поверхностью второго порядка в малой окрестности. Для этого окном размером $(2k+1) \times (2k+1)$, например $5 \times 5, 7 \times 7$, проходим по проекции облака точек $\mathbf{X}$ на плоскость Oxy прямоугольной области $\Omega \subset \mathbb{R}^2$. В каждом окне находится оценка параметрической модели, т.е. ищется поверхность $S(\mathbf{X})$, наименее уклоняющаяся от Z_{ij} . Задача решается методом наименьших

квадратов
$$S(\mathbf{X}, \mathbf{a}) = \sum_{i=1}^{2k+1} \sum_{j=1}^{2k+1} (z_{ij} - (\mathbf{a}, \varphi_{ij}))^2 \rightarrow \min_{\mathbf{a}}, \text{ где } \mathbf{a} = (a, b, c, d, f, h) \text{ – вектор}$$
 параметров, $\varphi_{ij} = (i^2, i \cdot j, j^2, i, j, 1)$ – система базисных функций, $1 \leq i, j \leq 2k+1$.

Разработанный алгоритм аппроксимации позволяет задать локальную гладкость реконструируемой поверхности, что на некоторых типах сцен дополнительно приводит к повышению точности на 1–2 %.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований пространственной реконструкции сцены, сравнение разработанных методов с известными методами.

Сравнение результатов работы производится на основе тестовых баз изображений, для которых достоверно известна пространственная структура, полученная непосредственным обмером трехмерной сцены независимыми измерениями, например лазерами, или сгенерированная синтетически.

Результат пространственной реконструкции на основе разреженных признаков на изображении представлен на рисунке 2.

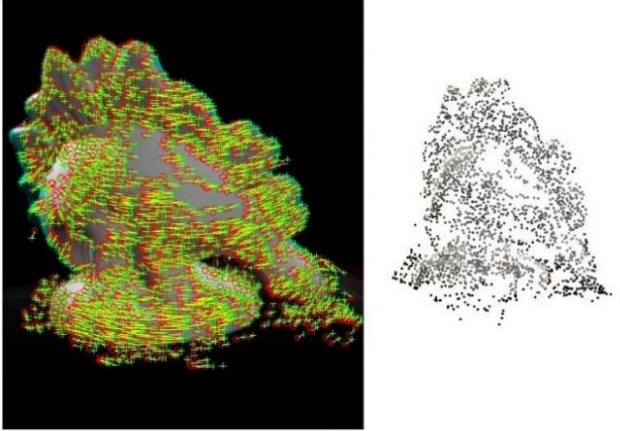


Рисунок 2 – Разреженные признаки на изображении (слева) и соответствующая им пространственная реконструкция (справа)

Ошибка вычисления фундаментальной матрицы (ошибка репроекции – отклонение положения пикселя на первом изображении от его верного образа на втором изображении) данным методом $e_F = 3,568$ пикселя (таблица 1).

Результат одновременного вычисления оптического потока и эллиптической геометрии демонстрирует рисунок 3. Визуализация поля смещения оптического потока представлена на рисунке 3 (слева). За счет того, что оптический поток определяет плотное сопоставление изображений, итоговая реконструируемая поверхность также будет плотно заполненной, что показано на рисунке 3 (справа).

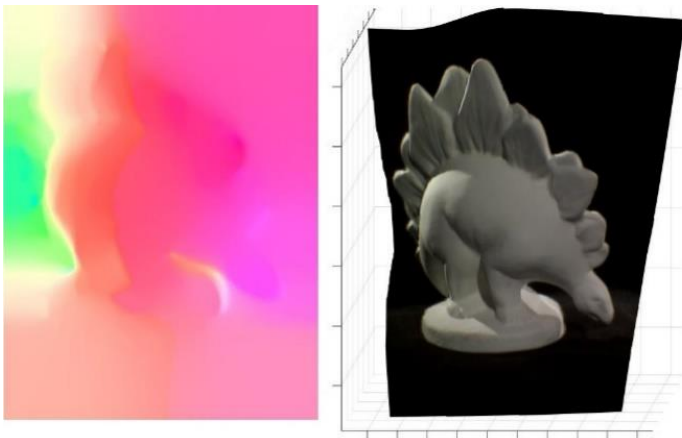


Рисунок 3 – Поле смещения оптического потока (слева) и пространственная реконструкция (справа)

Ошибки вычисления оптического потока определяются угловой ошибкой вектора оптического потока – AAE и ошибкой евклидова расстояния между двумя векторами – EPE . Для разработанного метода $AAE = 4,325^\circ$, $EPE = 0,56$ пикселя, тогда как для метода пространственной реконструкции на основе оптического потока без учета эпполярной геометрии $AAE = 5,107^\circ$, $EPE = 0,61$ пикселя (таблица 2). Ошибка вычисления фундаментальной матрицы разработанным методом $e_F = 0,917$ пикселя, что значительно ниже ошибки вычисления фундаментальной матрицы на основе разреженных признаков (таблица 1).

Таблица 1 – Ошибка вычисления фундаментальной матрицы e_F

Сцена		Разреженные признаки	Оптический поток	Разработанный метод
№	Название	e_F (пиксель)		
1	Dino	3,568	2,173	0,917

Таблица 2 – Ошибка вычисления оптического потока AAE/EPE

Сцена		Оптический поток	Разработанный метод
№	Название	AAE/EPE (угол/пиксель)	
1	Dino	5,107°/0,61	4,325°/0,56

Точность реконструкции определяется расстоянием от реконструируемой поверхности до достоверно известной поверхности модели. Для метода пространственной реконструкции на основе оптического потока без учета эпполярной геометрии $x\% = 1,39$ мм. Для разработанного метода $x\% = 0,87$ мм. Указанная величина означает, что 90 % расстояния от реконструируемой поверхности до эталонной не превышает указанного значения (таблица 3).

На рисунке 4 представлены эталонная модель и результат пространственной реконструкции на основе совместного вычисления оптического потока и фундаментальной матрицы с дополнительной регуляризацией реконструируемой поверхности. Влияние пространственной регуляризации заключается в глобальном сглаживании реконструируемой поверхности и подавлении выбросов. На рисунке 4 артефакты реконструкции выделены красным кружочком.

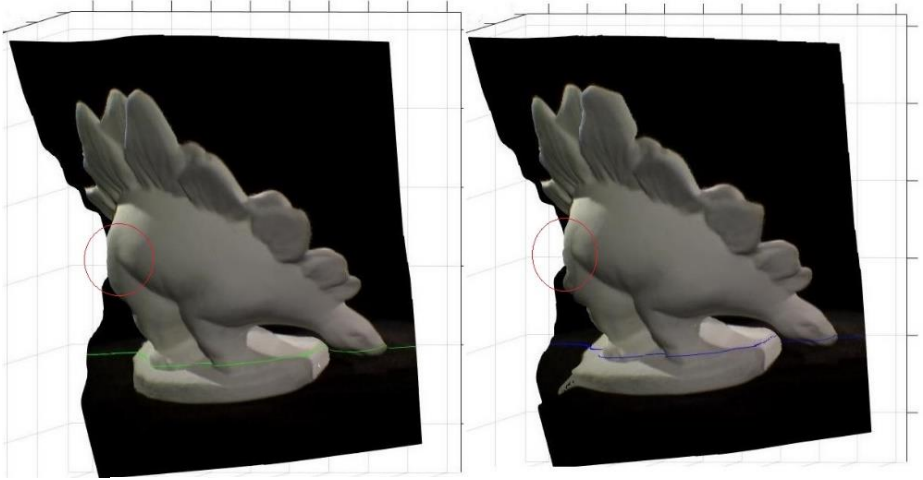


Рисунок 4 – Эталонная модель и результат пространственной реконструкции

Зеленым цветом на рисунке 4 (слева) и синим (справа) выделены контуры сравнения реконструируемой поверхности с эталонной. На рисунке 5 представлен график сравнения выделенных контуров.

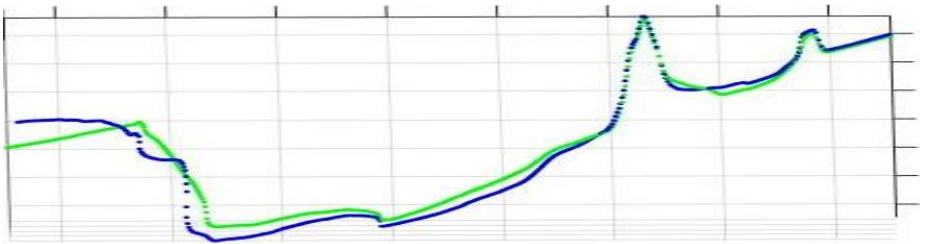


Рисунок 5 – Контуры сравнения эталонной модели (зеленый) и результата пространственной реконструкции (синий)

Таблица 3 – Ошибка реконструкции $\chi\%$

Сцена		Оптический поток	Разработанный метод	Разработанный метод + мин. поверхность	Разработанный метод + лок. аппроксимация
№	Название	90% (мм)			
1	Dino	1,39	0,87	0,83	0,85

Вычисление оптического потока в вариационной формулировке с минимизацией функционала является сложной подзадачей в разработанном методе пространственной реконструкции. Поэтому в данной работе была разработана специализированная аппаратно-программная среда для реализации вычисления оптического потока в масштабе реального времени. Для этого была выбрана высокопроизводительная платформа Xilinx ZYNQ7045 SoC на плате ZC706, которая является системой-на-кристалле и сочетает в себе двухъядерный процессор ARM Cortex-A9 с перепрограммируемой вентиляльной логикой (рисунок 6).

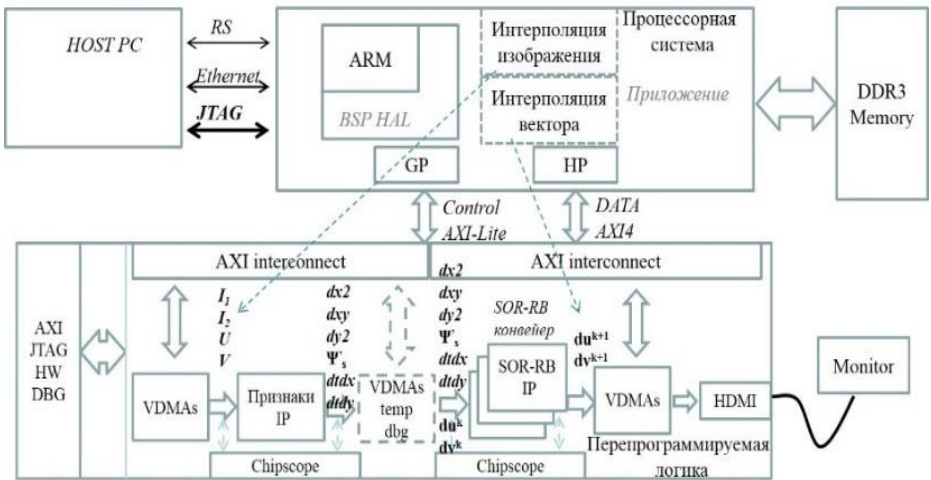


Рисунок 6 – Отладочная платформа Xilinx и структурная схема реализации вычисления оптического потока в системе-на-кристалле

Искомый вектор оптического потока $\mathbf{w}$ является минимумом функционала оптического потока и должен удовлетворять уравнениям Эйлера – Лагранжа. Поиск решения подобной задачи минимизации осуществляется численными методами решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые являются вычислительно сложными и ресурсозатратными. Поэтому был разработан алгоритм распараллеливания вычислений оптического потока и аппаратно реализован в системе-на-кристалле.

Аппаратная организация вычисления оптического потока, представленная на рисунке 7, призвана обеспечить вычисление оптического потока вариационным методом в реальном масштабе времени с сохранением высокой точности.



Рисунок 7 – Функциональная схема аппаратной организации вычисления оптического потока

Как показывают результаты экспериментальных исследований, за счет распараллеливания вычислений производительность удовлетворяет требованию выполнения в реальном времени. Так, время вычисления оптического потока на специализированной платформе составляет примерно 50 мс для изображений разрешением 640x480 пикселей, в то время как на процессоре общего назначения время вычисления составляет примерно 5 с.

Общее сравнение эффективности методов пространственной реконструкции приведено на рисунке 8.

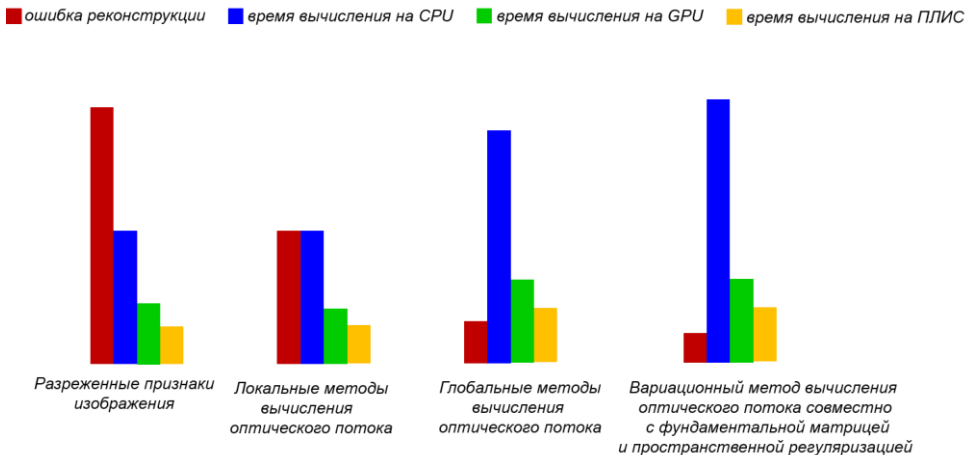


Рисунок 8 – Эффективность вычислительных методов пространственной реконструкции

Экспериментальные исследования, проведенные в четвертой главе, подтвердили теоретические выводы об эффективности использования разработанных методов и алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Усовершенствован метод совместного вычисления функционала оптического потока и фундаментальной матрицы с одновременным определением пространственных координат точек сцены, обеспечивающий повышение точности реконструкции пространственной модели сцены в реальном времени на 15 – 20 %.
2. Разработана методика регуляризации совместного функционала для минимизации площади реконструируемой сцены, обеспечивающая дополнительное повышение точности реконструкции на 5 – 7 %.
3. Создан алгоритм аппроксимации реконструируемой сцены для обеспечения гладкости реконструируемой поверхности.
4. Разработан алгоритм распараллеливания вычисления оптического потока вариационным методом, обеспечивающий ускорение вычислительного процесса.
5. Разработан аппаратно-программный стенд, позволяющий провести моделирование методов и алгоритмов реконструкции сцены и их теоретико-экспериментальные исследования.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Беляков, П.В. Модификация вариационного метода вычисления оптического потока для реализации на ПЛИС / П.В. Беляков, Е.В. Ларкин, М.Б. Никифоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – Вып. 9. – С. 19-28.
2. Беляков, П.В. Вариационный метод вычисления оптического потока в системе-на-кристалле / П.В. Беляков, М.Б. Никифоров // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – №3. – С. 76-82.
3. Беляков, П.В. Методы оптимизации в задаче вычисления оптического потока в системе на кристалле / П.В. Беляков, М.Б. Никифоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 2. – С. 45-52.
4. Беляков, П.В. Алгоритм построения пространственной структуры сцены / П.В. Беляков // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 331-339. (05.13.17)
5. Беляков, П.В. Метод вычисления плотного оптического потока на ПЛИС в реальном времени / А.В. Братулин, М.Б. Никифоров, П.В. Беляков, Е.Ю. Холопов //

Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 320-330. (05.13.17)

6. Беляков, П.В. Вариационный метод трехмерной реконструкции по изображениям / П.В. Беляков, М.Б. Никифоров, А.И. Новиков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2019. – С. 107-112. (05.13.17)

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах

7. Belyakov, Pavel. An fpga-optimized architecture of variational optical flow / Pavel Belyakov, Mikhail Nikiforov // Proc. in IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Kazan, 2018. – P.129-136. (WoS, Scopus)

8. Belyakov, Pavel. The Developing of Targets Tracking Complex / Tarasov Andrey, Potapova Valentina, Belyakov Pavel, Melnik Olga // Proc. in IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Kazan, 2018. – P. 800-805 2018. (WoS, Scopus)

9. Belyakov, Pavel. The information technology of the terrain attractiveness assessment / Vyacheslav A. Krivtsov, Elena M. Nikiforova, Natalya V. Akinina, Pavel V. Belyakov // Mediterranean conference on embedded computing (MECO-2019). – Montenegro, Budva, June 10 – 14, 2019. – P.791-794. (Scopus)

Работы, опубликованные в других изданиях

10. Беляков, П.В. Поиск ключевых точек на изображении / А.А. Абдухаликов, П.В. Беляков, М.Б. Никифоров // Материалы 28-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». Саратов – 2015. – Т. 9. – С. 144-147. (РИНЦ)

11. Беляков, П.В. Реализация на ПЛИС алгоритма поиска ключевых точек на изображении / А.А. Абдухаликов, П.В. Беляков, М.Б. Никифоров // Материалы Международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании». Рязань – 2016. – Т. 2. – С. 133-136. (РИНЦ)

12. Беляков, П.В. Аппаратная реализации решения СЛАУ на ПЛИС в задаче вычисления оптического потока / П.В. Беляков // Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань – 2016. – С.72-78. (РИНЦ)

13. Беляков, П.В. Сопровождение движущегося объекта на основе вариационного метода вычисления оптического потока / П.В. Беляков // Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань – 2017. – С.133-138. (РИНЦ)

14. Беляков, П.В. Программно-аппаратные средства улучшения изображений как система на кристалле / М.Б. Никифоров, Е.Р. Муратов, Д.И. Устюков, А.И. Баранчиков, П.В. Беляков // Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань – 2017. – С.105-112. (РИНЦ)

15. Беляков, П.В. Алгоритмическое обеспечение аппаратного вычисления оптического потока / П.В. Беляков // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвузовский сборник научных трудов / под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2018. – С. 75-81. (РИНЦ)

16. Беляков, П.В. Стереореконструкция изображений на основе оптического потока на ПЛИС / П.В. Беляков, М.Б. Никифоров // Материалы 31-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы (Биомедсистемы-2018)». Рязань – 2018. – С. 473-476. (РИНЦ)

17. Беляков, П.В. Построение карты глубины изображений в реальном времени / П.В. Беляков, М.Б. Никифоров // Материалы 23-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов: «Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2018)». Рязань – 2018. – С. 68-69. (РИНЦ)