

На правах рукописи



Любутин Павел Степанович

**АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ
В ОПТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(научные исследования)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, в лаборатории механики полимерных композиционных материалов.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, профессор РАН
Панин Сергей Викторович

Официальные оппоненты:

Дудоров Вадим Витальевич, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе

Катаев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра «Автоматизированные системы управления», профессор

Белим Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Комплексная защита информации», профессор

Защита состоится «25» июня 2021 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.15 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская д. 84/3, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, д. 53а и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пак Александр Яковлевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Современный уровень развития технологий автоматической обработки визуальной информации обуславливает их широкое применение во многих отраслях: микробиологии, медицине, материаловедении (анализ структуры), автоматизированных системах для выполнения широкого класса производственных операций и др. В рамках экспериментальной механики также существует ряд подходов, основанных на обработке и анализе изображений, получаемых, например, в ходе приложения воздействия к объекту исследований.

Обработка и анализ изображений являются одной из наиболее актуальных проблем, в рамках которой решается множество фундаментальных и прикладных задач. Как правило, термин «изображение» используется применительно к видимому диапазону электромагнитных волн. Однако разработка новых методов и аппаратных средств получения сигналов позволяет получать двумерные сигналы в диапазонах волн, отличных от видимого. В результате, независимо от типа датчика двух/трехмерного сигнала, основной задачей обработки и анализа изображений является получение информации, которая может служить для количественной характеристики (путем выбора и расчета информативных признаков) присутствующих на нем объектов.

Одним из приложений методов обработки и анализа изображений является проведение встроенного контроля деталей машин и элементов конструкций с применением датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ). Методика ДДИТ основана на регистрации оптических изображений поверхности тонкого (алюминиевого) чувствительного элемента (фольги), наклеенного на исследуемый нагружаемый материал или деталь. В современной литературе выделяется несколько подходов для анализа изображений с целью оценки деформационного состояния материала при воздействии на него механической нагрузки: спектральный подход, вейвлет-анализ, фрактальный анализ, вычисление информативных параметров и др. Исследования в данной области были изложены в работах В.Н. Сызранцева, С.Р. Игнатовича, М.В. Карускевича и др.

В настоящее время в научно-технической литературе получил широкое распространение термин «оптический поток» («optical flow»): движение яркостной картины, наблюдаемое при перемещении объектов перед камерой, либо камеры в неподвижной окружающей обстановке. Исследования по данной тематике появляются с начала 1980-х годов. Алгоритмы определения оптического потока широко используются в различных научных направлениях и практических задачах. В частности, для оценки полей скоростей течения потоков жидкости или газа с использованием метода цифровой трассерной визуализации (PIV – Particle Image Velocimetry), сжатия видеоданных, в роботизированных системах управления транспортными средствами. Среди основных методов выделяют: дифференциальные алгоритмы, фазовые (частотные) алгоритмы; блочные алгоритмы. Первые дифференциальные алгоритмы были предложены В. К. Р. Horn и В. G. Schunck, а также В. D. Lucas и Т. Kanade.

Развитие таких алгоритмов, в первую очередь, было основано на усложнении модели движения, которая учитывает, в частности аффинные преобразования, поворот и др. Изучаются проблемы фильтрации векторных полей. Проблему ошибок определения поля оптического потока часто решают с использованием пространственной регуляризации, которая в последствии была расширена до пространственно-временной. Алгоритмы вычисления оптического потока активно реализуются с использованием параллельных вычислений. Проводятся исследования по снижению вычислительных затрат алгоритмов определения перемещений на изображениях. К таким исследованиям относится применение многомасштабного иерархического подхода для обработки изображений при вычислении оптического потока и др.

В экспериментальной механике для оценки деформации твердых тел получил распространение метод корреляции цифровых изображений (DIC – Digital Image Correlation). Метод основан на определении перемещений через процедуру минимизации коэффициента корреляции как меры подобия участков изображений поверхности объекта до деформирования и после. В настоящее время метод корреляции цифровых изображений является одним из наиболее распространённых подходов к изучению процессов деформации и разрушения структурно-неоднородных материалов. Большой вклад в развитие метода корреляции цифровых изображений внесли M.A. Sutton, F. Hild, P. Lava, S. Roux, B. Pan и др.

Несмотря на достигнутые успехи в области разработки методов и алгоритмов оценки деформации, включая доступные коммерческие программные пакеты, остаются нерешенными задачи, связанные с недостаточной точностью, устойчивостью, высокими вычислительной сложностью и временными затратами при определении перемещений при оценке механического состояния объектов. В этой связи представляется актуальным решение проблемы анализа изображений в оптическом методе оценки деформации.

Цель диссертационной работы заключается в разработке комплексного подхода к обработке информации в оптических системах оценки деформационного состояния материалов и их свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Исследовать различные алгоритмы оценки фрактальной размерности и других информативных признаков для характеристики рельефа поверхности нагруженного материала. Установить параметры и исследовать влияние неадаптивной и адаптивной фильтрации изображений, основанной на оценке уровня шума на изображениях, на результат количественной оценки рельефа поверхности.

- Разработать адаптивный алгоритм определения размера ядра корреляции для целей автоматизации вычислений в оптическом методе оценки деформации.

- Разработать инкрементальный алгоритм определения перемещений на изображениях, позволяющий проводить их оценку в условиях значительного изменения рельефа поверхности и степени деформации до 50%.

- С целью кратного уменьшения времени построения векторных полей исследовать алгоритм трехмерного рекурсивного поиска и разработать ряд его модификаций для заданных условий функционирования.

- Применить иерархический подход к задаче определения перемещений на оптических изображениях для одновременного кратного уменьшения временных затрат и повышения устойчивости определения перемещений.

- Адаптировать алгоритм трехмерного рекурсивного поиска для реализации с помощью параллельных вычислений с целью значительного снижения времени построения векторных полей и использования данного алгоритма на многоядерных вычислительных системах.

- Исследовать возможность применения весовых коэффициентов в алгоритме вычисления оптического потока с целью повышения устойчивости определения перемещений, прежде всего на границах объектов в пределах области интереса.

- Разработать единый алгоритм обработки, анализа и интерпретации изображений в системе технического стереозрения, включающий этапы калибровки оптической системы, оценки перемещений, вычисления карт диспаратности и вычисления пространственных координат и деформаций поверхности исследуемого объекта.

Объектом исследования является процесс анализа изображений при оценке деформации нагруженных материалов.

Предметом исследования являются алгоритмы вычисления перемещений при оценке деформированного состояния и информативных признаков при определении рельефа поверхности материалов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан единый подход к обработке информации в оптических системах оценки деформации материалов, основанный на количественной характеристике рельефа на его поверхности и корреляционном анализе изображений (п. 2 паспорта специальности 05.13.01).

2. Разработано и проведено исследование серии алгоритмов обработки и анализа изображений поверхности объекта или датчика деформации интегрального типа, основанных на вычислении информативных признаков с целью оценки механического состояния материала. Применительно к датчикам интегрального типа в алгоритме адаптивной билатеральной фильтрации для оценки уровня шума на изображении предложено использовать параметр минимальной дисперсии $\min(D)$ (п. 3, 4 паспорта специальности 05.13.01).

3. Предложен алгоритм автоматического выбора размера ядра корреляции в задаче построения векторных полей при оценке деформации методом корреляции цифровых изображений, в основе которого лежит вычисление автокорреляционных функций (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

4. Развита алгоритмы построения полей векторов перемещений, основанные на инкрементальном подходе к оценке перемещений на изображении, отличающиеся от известных последовательным поиском перемещений с накоплением на изображениях серии близких по времени, что обеспечивает устойчивость как к а) изменению профиля поверхности материала, так и б) значительным по величине деформациям (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

5. Разработан комбинированный вероятностный алгоритм построения полей векторов перемещений, включающий а) трехмерный рекурсивный поиск и

б) иерархический подход к анализу изображений. Объединение двух указанных алгоритмов позволяеткратно повысить быстродействие и устойчивость определения перемещений в условиях существенной зашумленности изображений (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

6. Показано, что применение весовых коэффициентов позволяет повысить устойчивость определения перемещений (более чем на 8%), прежде всего на контрастных границах движущихся объектов на изображениях. Предложен способ вычисления коэффициентов билатерального фильтра по двум изображениям используемой пары, учитывающий произведение коэффициентов билатерального фильтра обоих изображений, что позволило снизить ошибку более чем на 34% (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

7. Разработана система технического стереозрения (СТСЗ) для задачи оценки перемещений и деформаций объектов. Алгоритмическое и программное обеспечение системы основано на комплексном использовании: а) алгоритма поиска и выделения узлов калибровочного шаблона, б) модифицированного инкрементального алгоритма определения перемещений на серии стереопар, в) алгоритма вычисления деформации на поверхности пространственного объекта с использованием восстановленного профиля поверхности объекта (п. 5 паспорта специальности 05.13.01).

Методы исследования. В качестве основных методов исследования в работе использованы методы обработки и анализа цифровых изображений, векторных полей, моделирования изображений на ЭВМ, теории вероятностей, математической статистики, теории оптимизации, физического и математического моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В работе разработаны элементы теории обработки изображений, в частности разработан единый подход к обработке информации в системах технического зрения для количественной оценки механического состояния нагруженных материалов.

Применение единых принципов, а также их дальнейшее развитие обеспечит более широкое внедрение систем технического зрения для исследования и оценки деформационного состояния материалов и оценки их свойств.

Внедрение оптических систем оценки деформации должно привести к существенному технико-экономическому эффекту в различных отраслях промышленности и науки. В частности, позволит повысить безопасность, экономическую эффективность промышленного оборудования, транспортных средств (в авиации), сложных инженерных объектов. Приведет к снижению издержек производства, а также повышению надежности и эксплуатационных характеристик оборудования. Позволит интенсифицировать исследования, а также получить дополнительные результаты в области прикладной механики, механики разрушения твёрдых тел, усталости материала, теории накопления усталостных повреждений. Это также будет способствовать как созданию новых материалов, необходимых современной промышленности, так и систем контроля механического состояния элементов механизмов и инженерных конструкций.

Разработано программное обеспечение для оценки механического состояния материала на основании количественного расчета и анализа изображений датчика деформации интегрального типа (получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ). Разработано программное обеспечение для построения полей векторов перемещений и оценки деформаций, в основе которого лежат предложенные алгоритмы (получены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ).

Положения, выносимые на защиту:

1. Подход к оценке механического состояния нагруженного материала, основанный на количественной характеристике рельефа на его поверхности с использованием алгоритмов вычисления фрактальной размерности и других выбранных информативных признаков, который включает применение адаптивных методов фильтрации, что позволяет повысить достоверность оценки рельефа (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

2. Принцип адаптивного определения параметров билатеральной фильтрации, основанный на расчете минимальной дисперсии $\min(D)$ яркости изображения, характеризующей величину шума на изображении, что позволяет минимизировать влияние шумов и помех при получении количественной оценки рельефа поверхности (п. 3 паспорта специальности 05.13.01).

3. Алгоритм адаптивного определения апертуры в методе корреляции цифровых изображений, основанный на вычислении автокорреляционных функций и наборе их параметров, который обеспечивает минимальную ошибку определения деформации (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

4. Инкрементальный принцип и соответствующие алгоритмы определения перемещений для класса изображений, характеризующихся существенным изменением во времени и пространстве рельефа поверхности, позволяющие проводить оценку перемещений и деформации при изменении оптического образа более чем на 50% относительно исходного состояния (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

5. Серия алгоритмов построения полей векторов перемещений, основанных на трехмерном рекурсивном поиске, включая иерархический подход к анализу изображений, обеспечивающий одновременное повышение быстродействия до 10 раз и устойчивости расчета более чем в два раза по сравнению с алгоритмами, использующими свертку (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

6. Параллельный рекурсивный алгоритм построения полей векторов перемещений PDRS, основанный на применении модифицированного алгоритма рекурсивного поиска, позволяющий снизить время построения полей векторов перемещений до 27 раз по сравнению с известными алгоритмами, реализующими последовательный расчет (п. 5 паспорта специальности 05.13.01).

7. Способ повышения устойчивости оценки перемещений для класса изображений, содержащих большое количество перекрывающихся объектов, основанный на использовании весовых коэффициентов билатерального фильтра, позволяющий снизить ошибку определения перемещений на границах объектов на 34% (п. 4 паспорта специальности 05.13.01).

8. Алгоритм функционирования системы технического стереозрения, основанный на последовательном проведении процедур: а) калибровки оптической системы, б) инкрементальной оценки перемещений, в) вычисления карт диспаратности, с целью вычисления координат и деформаций поверхности исследуемого объекта в трехмерном пространстве, что обеспечивает по сравнению с системой на основе одной камеры снижение ошибки оценки деформации более чем в 10 раз (п. 5 паспорта специальности 05.13.01).

9. Единый подход к обработке информации в системах оценки деформационного состояния и свойств материала, основой которого является корреляционный анализ изображений (включающий комплекс разработанных алгоритмов оптимизации и параллельных вычислений), а ключевыми количественными показателями - точность определения перемещений и временные затраты, определяющие и лимитирующие применение конкретной реализации системы технического зрения (п. 2 паспорта специальности 05.13.01).

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритмов обработки изображений, программной реализации алгоритмов и их модификаций, исследовании и тестировании реализованных алгоритмов. Разработке алгоритмов моделирования изображений, отражающих различные схемы формоизменения поверхности исследуемого материала.

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационная работа выполнена в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН в соответствии с планами государственных и отраслевых научных программ: Программа г/б исследований СО РАН № 8.2 «Научные основы создания композиционных и наноструктурных материалов на металлической, керамической и полимерной основах с высокими механическими и функциональными свойствами» (2004-2006 гг.); Комплексный проект г/б исследований СО РАН «Разработка принципов физической мезомеханики многоуровневых систем и создание на их основе конструкционных и функциональных материалов с наноструктурой во всем объеме, только в поверхностных слоях, с наноструктурными покрытиями или модифицированными наноструктурными наполнителями» (2007-2009 гг.); РФФИ 02-01-81003-Бел2002_а «Механика пластической деформации и разрушения поверхностно-упрочненных твердых тел» (2002-2004 гг.); РФФИ 04-01-08030-офи_а «Повышение усталостной прочности высокопрочных конструкционных материалов объектов типа СУ-27 путем создания наноструктур в их поверхностных слоях комбинированным методом ионноплазменного осаждения покрытия - ионной имплантации - ультразвуковой обработки» (2004-2005 гг.); РФФИ 05-01-00767-а «Физическая мезомеханика границ раздела в конструкционных материалах с упрочняющими покрытиями и наноструктурированными поверхностными слоями» (2005-2007 гг.); РФФИ 05-01-98008-р_обь_а «Исследование механического поведения нанокристаллических керамик опико-телевизионными системами регистрации» (2005-2007 гг.); РФФИ 06-08-96938-р_офи «Исследование механизмов зарождения и развития усталостных трещин в сварных соединениях трубопроводного транспорта и разработка методов повышения их усталостной прочности и долговечности путем наноструктурирования их поверхностных слоев» (2006-2008 гг.); РФФИ 09-08-90404-Укр_ф_а «Научные основы повышения тер-

моусталостной стойкости нержавеющей стали путем наноструктурирования и контролируемого множественного растрескивания в поверхностных слоях» (2009-2010 гг.); Программа фундаментальных исследований отделения ЭММПУ РАН №4.12.5 «Мезомеханика множественного растрескивания наноструктурных покрытий с зубчатым градиентным подслоем при активном нагружении» (2006-2008 гг.); РФФИ 12-08-31042-мол_а «Разработка научных основ комбинированного акустико-оптического метода диагностики состояния нагруженных материалов» (2012–2013 гг.); РФФИ 13-07-00009-а «Развитие быстродействующих и помехоустойчивых алгоритмов обработки и анализа оптических и акустических сигналов для комбинированного метода контроля состояния нагруженных материалов» (2013–2015 гг.); РФФИ 15-08-05818-а «Многоуровневое описание малоциклового усталости поликристаллических и наноструктурных сред с учетом ротационных мод деформации» (2015-2017 гг.); РФФИ 17-18-00094-д Издание научного труда «Анализ изображений в оптическом методе оценки деформации» (2017 г.); Проект № III.20.1.3 «Разработка методологии и критериев диагностики состояния нагруженных материалов на основе многоуровневого подхода» (2010–2012 гг.); Проект фундаментальных исследований государственных академий наук №III.23.1.3. «Научные основы диагностики предразрушения и оценки ресурса работы многоуровневых структурно-неоднородных сред» (2013–2016 гг.); Проект фундаментальных исследований государственных академий наук №III.23.1.3. «Научные основы многоуровневого подхода к мониторингу, оценке механического состояния и диагностике предразрушения конденсированных сред и мягкой материи (soft matter)» (2017-2019 гг.); Проект ФЦП «Разработка с использованием многоуровневых компьютерных моделей иерархически армированных гетеромодульных экструдированных твердосмазочных нанокомпозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для применения в узлах трения и футеровки деталей машин и механизмов, работающих в условиях Крайнего Севера» (соглашение с Минобрнауки РФ №14.604.21.0154, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60417X0154, 2017-2018 гг.); Проект ФЦП «Разработка научных основ нового метода постобработки изделий, сформированных аддитивными технологиями, основанного на комбинированном импульсном высокочастотном многоуровневом механо-электрофизическом воздействии» (соглашение с Минобрнауки РФ №05.583.21.0089, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58318X0089, 2018-2020 гг.).

Внедрение работы. Автор принимал участие в работе по договору «Разработка оптического метода встроенного контроля высоконагруженных агрегатов планера» (2008-2009 гг.) и «Исследование возможности применения встроенных методов неразрушающего контроля для металлических и полимерных композиционных материалов» (2014-2017 гг.) между Филиалом ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» и ИФПМ СО РАН. Практическая значимость работы также подтверждается актами ее использования, полученными от Indian Institute of Science, LM Wind Power, BISS Ltd, ПАО «Компания «Сухой», ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина», Центр экспериментальной механики ПНИПУ, ООО «Композит ДВ», ТНТУ им. Ивана Пулюя. Акты внедрения приведены в приложениях диссертации. Результаты диссертации используются в учебном процессе в отделении материа-

поведения Инженерной школы Новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета при подготовке образовательных дисциплин «Мониторинг состояния и контроль надежности материалов и изделий» и «Диагностика материалов» для магистров по направлению 22.04.01 – Материаловедение и технологии материалов.

Достоверность полученных результатов. Степень обоснованности результатов, изложенных в диссертации, обеспечивается корректностью постановки задачи, сопоставительным анализом предложенных подходов и алгоритмов. Подтверждается тестированием и исследованием алгоритмов на модельных и экспериментально полученных изображениях, согласием полученных результатов с представленными в научной литературе.

Апробация работы. Основные научные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: International Workshop «Advanced problems of Mechanics and Physics of Mesoscopic Systems», February 1-4, 2011, Perm, Russia; VII Российская научно-техническая конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение», 23-27 апреля 2012, Екатеринбург, Россия; 18th World Conference on Non-Destructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa; Школа-семинар «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов» 27 февраля - 2 марта, 2013, Новосибирск; Russia-China International Workshop «Development of advanced materials and processing technology for energy-saving applications», 9-13 September 2013, Tomsk, Russia; 7th International conference on airworthiness and fatigue, 25-27 March, 2013, Beijing, China; 12th Asian Symposium on Visualization ASV-12, May 19-23, Tainan, Taiwan, 2013; International workshop «Failure of Heterogeneous Materials under Intensive Loading: Experiment and Multi-scale Modeling», February 10-14, 2014, Perm, Russia; XX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, 3-6 марта, 2014, Москва, Россия; III Всероссийская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Академика Ю.Н. Работнова, 26-30 мая, 2014, Новосибирск, Россия; VIII Российская научно-техническая конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 26-30 мая, 2014, Екатеринбург, Россия; 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic; ICAF-2014, 14-18 July, 2014, Patras, Greece; XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20 – 24 августа 2015; 1st Structural Integrity Workshop, Conference and Exhibition, Bengaluru, India, July 2-6, 2016; 2nd International Structural Integrity Conference and Exhibition, Hyderabad, India, July 25-27, 2018; III Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции» 26-27 ноября, 2019 Томск, Россия; 9th International Conference on materials structure & micromechanics of fracture (MSMF9), Brno, Czech Republic, June 26-28, 2019.

Публикации. По теме диссертации опубликована 51 работа, в том числе 35 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук,

19 статей в журналах индексируемых в базах Web of Science и Scopus, 2 монографии, 11 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы. Объем работы составляет 304 страницы, включая 111 рисунков, 16 таблиц, 230 библиографических наименований и 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дано общее описание работы и ее актуальности, анализируется степень разработанности темы за рубежом и в России, формулируется цель, перечисляются задачи исследования, обосновываются достоверность, теоретическая и практическая значимость, а также новизна полученных результатов.

В первой главе рассмотрены принципы обработки изображений в системах оценки деформационного состояния материала по рельефу на его поверхности. Одной из количественных мер оценки деформированного состояния является фрактальная размерность (ФР). Проведено сравнение нескольких методов ее вычисления: треугольных призм; показателя Херста; структурной функции; изаритм. Тестирование методов проводили с использованием модельных и экспериментально полученных оптических изображений и микрофотографий с растрового электронного микроскопа.

Показано, что значения ФР Df , рассчитанные каждым из четырех способов, имеют близкие значения, а также идентичную тенденцию изменения. Построены зависимости, отражающие величину энергии амплитудного Фурье спектра от пространственной частоты в диапазоне от 1 до 100. При малом значении ФР ($Dg=2,1$), основная энергия спектра сосредоточена в области низких пространственных частот, в то время как при высоком значении ФР ($Dg=2,9$) энергия практически однородно распределена в отображаемом диапазоне, что свидетельствует о наличии на изображении значительного числа элементов малого размера.

Следующим этапом исследования была разработка адаптивного метода билатеральной фильтрации изображений, основанного на оценке уровня шума. Метод был протестирован на сериях оптических изображений поверхностей образцов конструкционных материалов, зарегистрированных в процессе испытаний на циклическое растяжение. Одним из критериев для количественной оценки шума является построение функции его уровня

$$f_{NL}(E_v, f_{CR}, \sigma_{PRNU}, \sigma_{shot}, \sigma_{kTC}) = \sqrt{E\{(I_N - I)^2\}}, \quad (1)$$

где E_v - освещенность, f_{CR} - функция отклика камеры (CR – Camera response), σ_{PRNU} - неоднородность фотосигнала, также известная как шум с фиксированным распределением (PRNU – Photo Response Non-Uniformity), зависящая от уровня падающего излучения, σ_{shot} - составляющая фотонного шума и шума темнового тока, σ_{kTC} - составляющая шума сброса вызванного зарядкой/разрядкой датчика (Reset Noise kTC), I_N - интенсивность зашумленного изображения, I - интенсивность исходного изображения. Были построены зависимости функции уровня шума f_{NL} от математического ожидания μ_b яркости для всех фрагментов изобра-

жения размером 16×16 пикселей, для исходного изображения и изображений после билатеральной фильтрации с различными параметрами.

В качестве параметра билатеральной фильтрации использовали количественную оценку f_{NL} , основанную на определении минимального значения дисперсии яркости сигнала $\min(D)$. Значение σ_r для каждого пиксела рассчитывали по формуле:

$$\sigma_r = C \cdot f_{NL}(I(i, j)), \quad (2)$$

где C – корректирующий коэффициент, $I(i, j)$ – интенсивность пикселя с координатами (i, j) .

Для нахождения количественной оценки влияния параметров нелинейной адаптивной фильтрации также использовали зависимость энергии амплитудного Фурье спектра оптических изображений от пространственной частоты, что позволяло оценить изменения с позиции частотного диапазона. Была построена поверхность, иллюстрирующая зависимость среднего уровня f_{NL} от параметров билатеральной фильтрации σ_d и C . Характер приведенной зависимости имеет экстремум и показывает, что именно параметр фильтрации $\sigma_d \approx 0,8$ рекомендуется для обработки оптических изображений. Дальнейшее увеличение σ_d до 2 приводит к сильному сглаживанию изображения и потере ряда важных деталей на нем. Таким образом, построение поверхности такого типа позволяет заранее подобрать параметры фильтрации.

Также в главе рассмотрен ряд интегральных критериев оценки изображений, таких как MSE, PSNR, VSNR, UIQ, информационная энтропия для характеристики состояния с помощью датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ). Построен график нормированных величин критериев оценки изображения (рисунок 1). Исследование проводили на изображениях поликристаллической алюминиевой фольги, наклеенной на прямоугольные плоские образцы углеродного композита с двумя центральными V-образными надрезами, которые испытывали на одноосное циклическое растяжение.

Определены наиболее чувствительные к деформации и искажениям критерии оценки оптических изображений, к которым следует отнести H , MSE, E_{fc} и $H-MSE$. Выбор осуществлялся на основании установления близости характера изменения указанных параметров к линейному. Показано, что для этих параметров характер изменения по мере возрастания величины циклической наработки для всех видов искажений изменяется незначительно. Поскольку параметры H и MSE чувствительны каждый в своем диапазоне, предлагается использовать комбинированный критерий $H-MSE$, являющийся их средним арифметическим значением. Данный комплексный критерий является чувствительным к изменениям деформационного рельефа на поверхности датчика (фольги), а также сохраняет помехоустойчивость в исследованном диапазоне искажений (зашумления, размытия, компрессии). Эти параметры могут быть рекомендованы в качестве критериев оценки изображений, полученных методом ДДИТ.

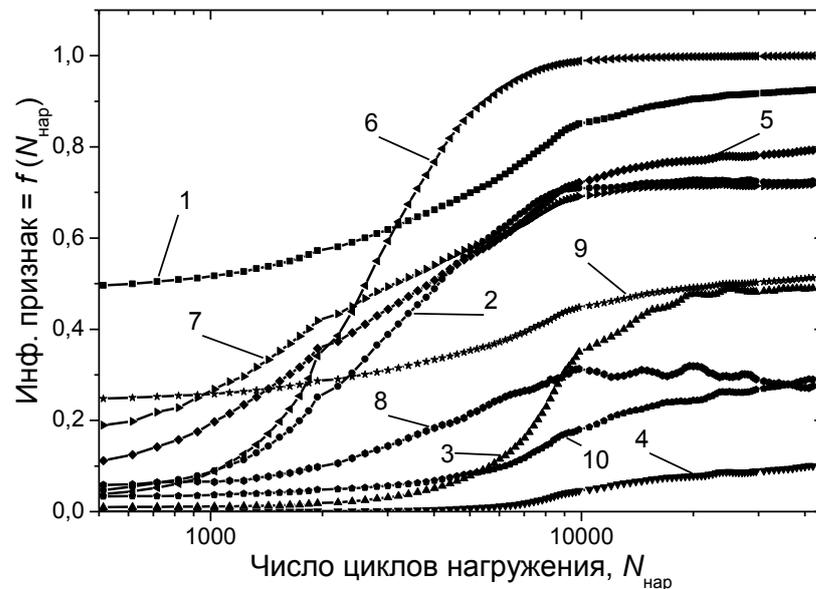


Рисунок 1 – Графики зависимости различных критериев оценки качества исходных экспериментальных изображений от величины наработки (количества циклов нагружения); 1) H ; 2) F_d ; 3) $E_{ФС}$; 4) MSE; 5) PSNR; 6) UIQ; 7) VSNR; 8) S_q ; 9) $H-MSE$; 10) $I_{ср}$

Вторая глава посвящена формализации метода корреляции цифровых изображений. Рассмотрены основные проблемы, связанные с определением перемещений по оптическим изображениям: размер апертуры, проблема сопоставления участков и текстуры изображений. Алгоритмы построения полей векторов перемещений (ПВП) для серии изображений в общем виде основаны на минимизации функционала

$$E(w, S) = E_D(w, S) + \alpha E_S(w, S), \quad (3)$$

где w – функция перемещений, S – область изображения, по которой минимизируется E , E_D – мера подобия блоков изображений, E_S – мера подобия векторов, α – регуляризационный коэффициент.

Меры близости E_D двух участков текущего изображения (ТИ) и эталонного изображения (ЭИ) могут определяться различными функциями, условием применимости которых является наличие экстремума, обычно минимума. Наиболее простой мерой близости является сумма квадратов разности:

$$SSD = \sum_{X \in S} (F(X) - G(X, w))^2, \quad (4)$$

где $F(X)$, $G(X, w)$ – значения яркости пикселей сравниваемых участков ТИ и ЭИ соответственно, X – координаты пикселей участка S .

Одной из наиболее сложных мер является нормированная сумма квадратов разности с нулевым средним:

$$ZNSSD = \sum_{X \in S} \left(\frac{F(X) - \bar{F}}{\sqrt{\sum_{X \in S} (F(X) - \bar{F})^2}} - \frac{G(X, w) - \bar{G}}{\sqrt{\sum_{X \in S} (G(X, w) - \bar{G})^2}} \right)^2, \quad (5)$$

где \bar{F} и \bar{G} – среднеарифметические значения участков ТИ и ЭИ соответственно.

Существует два пути нахождения минимума функционала E :

- Блочный метод. Область S начального изображения сравнивается в скользящем окне с таковым на втором изображении. Часто это используется для предварительного поиска больших перемещений с пиксельной точностью. Не используется в сочетании со сложной функцией перемещений, т.к. приводит к неоправданно большим вычислительным затратам.

- Дифференциальный метод. Используется алгоритм Ньютона-Рафсона или обратный алгоритм Гаусса-Ньютона. Такой подход напротив используется в субпиксельной области, поскольку обеспечивает устойчивую сходимость в диапазоне перемещений $-1 \div 1$ пиксел.

Оптимизационный метод Ньютона-Рафсона может быть записан в общем виде:

$$P^{k+1} = P^k - \frac{\nabla E(P^k)}{\nabla \nabla E(P^k)} \quad (6)$$

где k – номер итерации, P – искомый вектор функции перемещений, включающий перемещение. Матрицы $\nabla E(P^k)$ и $\nabla \nabla E(P^k)$ записываются следующим образом:

$$\nabla E(P) = \left[\frac{\partial E}{\partial p_0} \quad \dots \quad \frac{\partial E}{\partial p_n} \right]^T; \nabla \nabla E(P) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial p_0^2} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial p_0 \partial p_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial p_n \partial p_0} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial p_n^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

При определении неоднородных сложно распределённых деформаций на изображениях применяют функции перемещений высших порядков. В частности, функция перемещений, учитывающая аффинные деформации, имеет вид:

$$w(X, P) = \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_2 & p_4 \\ p_3 & p_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

Был предложен комбинированный алгоритм сочетающий поиск перемещений блочным методом и алгоритм Гаусса-Ньютона, позволяющий определять перемещения с субпиксельной точностью. Обновление вектора P требует пересчет яркости анализируемой области изображения S . Пересчет осуществлялся с использованием бикубического интерполирования.

Рассмотрена проблема автоматического выбора размера апертуры в методе корреляции цифровых изображений. Предлагается алгоритм выбора размера ядра корреляции CA из значений n , лежащих в диапазоне $0 < n < \min\{w/4; h/4\}$, где w и h – ширина и высота изображения, \min – минимальное значение из аргументов. Алгоритм основан на вычислении автокорреляционной функции и количественной её характеристики, включающий следующие этапы.

1. На первом этапе вычисляются автокорреляционные функции в горизонтальном и вертикальном направлениях, на основе нормированного коэффициента корреляции с нулевым средним

$$ZNCC = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (9)$$

где X, Y – яркости сравниваемых участков изображения, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ – средние значения яркостей тех же участков. Значения автокорреляци-

онных функций определяются через усреднение трёх строк или столбцов изображения соответственно.

2. Вычисляется ряд параметров относительно n , изменяющегося в диапазоне $2 < n < 64$ для полученных автокорреляционных функций в горизонтальном и вертикальном направлениях: FS – ширина автокорреляционной функции при $ZNCC=0,5$; N – число малококонтрастных областей на изображении. Области изображения со среднеквадратическим отклонением яркости меньше порога равного 10 будем считать малококонтрастными; P – число экстремумов автокорреляционной функции, превышающих значение 0,5.

3. Пункты 1–2 повторяются для различных n .

4. Определяется минимальное значение n , для которого выполняется условия:

- Автокорреляционные функции должны иметь один экстремум ($P = 1$), то есть каждый участок изображения $n \times n$ обладает уникальной яркостной картиной;
- При найденном значении n не должно быть малококонтрастных областей на изображении ($N = 0$).

5. Начиная с выбранного в п.4 значения n , подбирается такое, что выполняется условие $FS(n) \leq FS(n+1)$. Полученное значение и принимается в качестве искомого СА.

Исследование проводилось на различных модельных и экспериментально полученных текстурах изображений (таблица 1). Определенные в результате работы алгоритма размеры апертуры совпадают со значениями, соответствующими минимальной ошибке продольной компоненты тензора деформации $\delta\varepsilon_{xx}$, или незначительно их превышают.

Таблица 1 – Результаты расчета параметров при выборе размера СА

Номер текстуры изображения	Размер СА				По минимальной ошибке $\delta\varepsilon_{xx}$
	По алгоритму				
	по параметру P	по параметру N	по параметру FS	Итог	
1	16	16	16	16	14
2	10	10	10	10	10
3	26	48	48	48	46
4	14	12	16	16	12
5	12	12	12	12	10
6	22	52	52	52	42

Конечным результатом работы системы являются рассчитанные компоненты деформации. Компоненты рассчитываются путем численного дифференцирования полученного поля перемещений. Выражения для продольной ε_{xx} , поперечной ε_{yy} , сдвиговой ε_{xy} и поворотной ω_z компонент тензора деформации имеют вид:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (10)$$

Дифференцирование полей векторов перемещений также осуществляется с помощью метода Савицкого-Голэя (Savitzky–Golay). Метод основан на аппроксимации области поля векторов перемещений полиномом и последующем его диф-

ференцировании. Коэффициенты аппроксимирующего полинома определяются с помощью метода наименьших квадратов.

Верификация алгоритмов проводилась с использованием модельных изображений. Изображение реальной поверхности представляет собой оптический образ, каждый участок которого характеризуется определенной яркостью (интенсивностью отраженного света). При дальнейшем описании моделирования изображений под термином "поверхность" будем понимать непрерывную функцию яркости (оптический образ). Построение модельных изображений можно разбить на несколько этапов:

- Получение набора дискретных отсчетов яркости (узловых точек) "поверхности" с заданным распределением;
- Построение непрерывной яркостной картины ("поверхности") путем интерполирования полученных узловых точек;
- Задание параметров (типа и приращения) деформации и перерасчет "поверхности" с учетом заданных значений;
- Дискретизация "поверхности" с целью получения модельного изображения.

При значительных по величине деформациях поверхности образца определение перемещений становится затруднительным. Они могут определяться некорректно. При дифференцировании поля векторов, некорректно найденные вектора будут давать «выбросы» на полях компонент деформации. Поэтому необходима дополнительная постобработка полей векторов перемещений. В работе рассмотрена корректировка векторов с использованием процедуры постобработки с оценкой выбросов на перемещениях, фильтрация и сглаживания полей векторов перемещений.

Развитые в Главе 2 теоретические представления далее были использованы при разработке алгоритмов и методов анализа изображений в Главах 3-5.

В третьей главе отражены результаты дальнейшего развития подходов по повышению устойчивости определения перемещений и снижению вычислительных затрат алгоритмами построения полей векторов перемещений.

При исследовании деформационного поведения образцов конструкционных материалов методом корреляции цифровых изображений одним из основных факторов, лимитирующих получение надежной оценки деформации, является приращение внешней нагрузки, обуславливающее изменение рельефа на поверхности. В случае, когда изменение последнего между двумя соседними сопоставляемыми изображениями достаточно велико, наблюдается заметное изменение яркостной картины. В этом случае достоверно сопоставить участки начального и текущего изображений не представляется возможным. В связи с этим, применение традиционных алгоритмов определения перемещений вызывает большое количество ошибок, т.к. нет возможности корректно построить векторное поле, либо отдельные вектора на нем.

В процессе измерения деформации объектов во времени производится запись и обработка серий изображений с большим количеством кадров в них. Используя несколько кадров, а в идеальном случае всю последовательность изображений, можно получить необходимую недостающую информацию. Был предло-

жен инкрементальный алгоритм определения перемещений, основанный на оценке перемещений участков соседних изображений в серии с учетом таковых, найденных для предыдущих пар изображений. Таким образом, проводится слежение за перемещением одного и того же участка поверхности, который изменяется во времени. Положение участка оценивается с субпиксельной точностью. Поскольку изменения между соседними изображениями в серии значительно меньше, чем между начальным и текущим изображениями, то устойчивость и точность определения перемещений значительно возрастает. Инкрементальный алгоритм был протестирован на серии модельных изображений, отражающих изменение профиля поверхности. Преимущество предложенного инкрементального алгоритма, особенно заметно при существенных изменениях исходной яркостной картины (кадры 10-25) (рисунок 2).

Алгоритм трехмерного рекурсивного поиска (3D recursive search - 3DRS) получил широкое распространение при обработке видеопотоков данных и с его помощью становится возможным значительно снизить время построения векторного поля. При этом построение каждого вектора перемещений производится на основании выбора из набора векторов-кандидатов с использованием процедуры поиска минимума меры подобия, в качестве которой используется сумма абсолютных разностей SAD фрагментов изображения – текущего и предыдущего кадров. Алгоритм имеет вероятностный характер, когда вектора кандидаты указывают предположительное направление смещения фрагментов изображения. Набор векторов-кандидатов включает как временную (величина перемещения на предыдущем кадре), так и пространственную составляющую (соседние вектора перемещений).

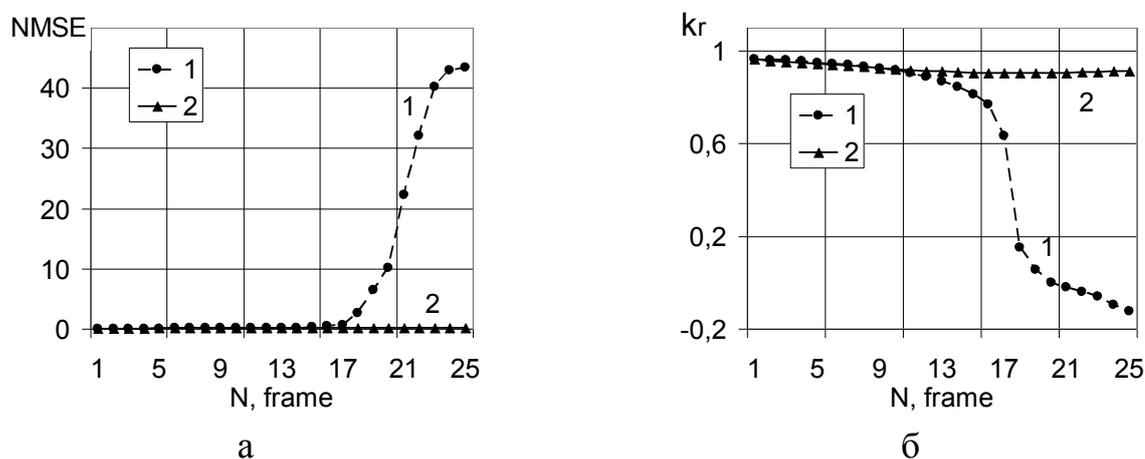


Рисунок 2 – Зависимости NMSE (нормированная среднеквадратическая ошибка) (а) и kr (б) от номера кадра для комбинированного (1) и инкрементального алгоритма (2)

Построение векторов осуществляется с левого верхнего угла построчно к правому нижнему. Затем, процедура повторяется в обратном направлении. Процедура построения векторов, выполненная в прямом и обратном направлении, называется «проходом». Проход повторяется заданное количество раз. Если кадр

был первым в серии и осуществляется первый проход, то набор кандидатов заполняется нужным количеством случайных кандидатов.

Проведено исследование по выбору количества кандидатов C и количества проходов S в 3DRS алгоритме. Были получены зависимости коэффициента корреляции K_r и времени построения поля векторов перемещений t от параметров C и S . После достижения значений $S = 4$ и $C = 8$ рост коэффициента корреляции значительно замедляется. Одновременно временные затраты на построение векторного поля продолжают расти. Существует сочетание значений S и C при которых будет достигаться оптимальное соотношение времени расчета и устойчивости. Фактором ограничения количества проходов S может служить какая-либо мера, показывающая отклонение векторов, рассчитанных на текущей и предыдущей итерациях.

Проведено исследование возможности применения иерархического подхода в рамках алгоритма 3DRS. Предполагается за счет иерархического рассмотрения снизить вычислительные затраты вследствие уменьшения числа кандидатов. Вектора перемещений, рассчитанные на верхних иерархических уровнях, становятся исходными данными для формирования кандидатов обновления на нижних уровнях. Помимо этого, иерархическое рассмотрение изображений должно способствовать повышению помехоустойчивости в случаях наличия высокочастотного шума. Был предложен иерархический алгоритм, который заключается в следующем:

1. Задается пороговое значение th_{NSAD} .
2. Рассчитывается количество иерархических уровней p_{max} .
3. Выбирается начальное значение уровня p .
4. Начальное изображение уменьшается до уровня p .
5. Строится векторное поле на текущем иерархическом уровне.
6. Рассчитывается мера $NSAD$ (нормированная абсолютная разность) между текущим векторным полем и вычисленным на предыдущем проходе.
7. Если величина $NSAD$ больше th_{NSAD} , то переходим к п. 5 и происходит перерасчет векторного поля, в противном случае переходим к п. 8.
8. Если текущий уровень соответствует исходному размеру изображения, то выходим. В противном случае уменьшаем иерархический уровень $p = p - 1$ и производится переход к п. 4.

Масштабирование проводили путем уменьшения изображения в 2 раза на каждом последующем уровне. Построение поля проводили с сохранением размера сканирующего окна и шага сетки. Количество иерархических уровней изображений ограничивалось размером получаемого векторного поля: минимальное число векторов по ширине или высоте не должно быть меньше 3.

Предложенный иерархический 3DRS алгоритм был сопоставлен с базовым 3DRS алгоритмом и инкрементальным алгоритмом. Временные затраты при использовании алгоритмов оценивали на серии модельных изображений. 3DRS алгоритм показывает почти в 10 раз меньшее время построения векторного поля по сравнению с инкрементальным алгоритмом (рисунок 3, а). Оба алгоритма являются комбинированными, и различаются по принципу определения перемещений в пиксельной области. Принцип определения перемещений в субпиксельной обла-

сти у всех представленных алгоритмов одинаков. Применение иерархического алгоритма 3DRS-P (рисунок 3, а) позволяет дополнительно в 5,3 раза уменьшить время построения полей. При этом K_r сохраняется на уровне не ниже 0,98 (рисунок 3, б, кривая 2) при увеличении амплитуды шума.

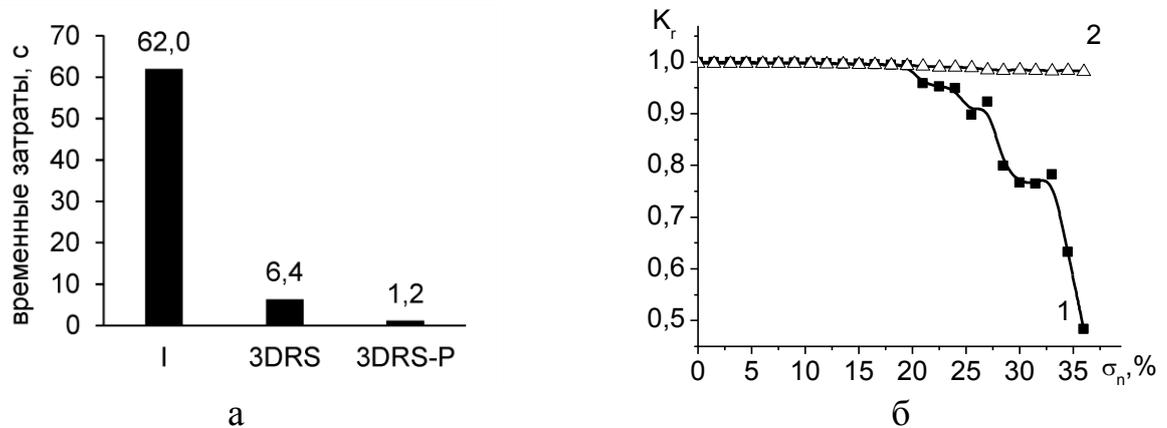


Рисунок 3 – Время построения векторного поля (а) и коэффициент корреляции векторных полей (б) от амплитуды шума σ_n для серии модельных изображений. Обозначения кривых: 3DRS (кривая 1), 3DRS-P (кривая 2)

Актуальной задачей развития вычислительных средств является использование недорогих многоядерных аппаратных решений на основе графических процессоров, что позволяет задействовать аппарат параллельных вычислений и значительно снизить время обработки данных. На основе алгоритма трёхмерного рекурсивного поиска был реализован модифицированный алгоритм построения векторов перемещений, который также использует подход рекурсивного поиска перемещений (DRS). Затем, данный модифицированный алгоритм был переработан для проведения вычислений в параллельном виде (PDRS). Одним из ограничений при разработке параллельного алгоритма является тот факт, что оценка перемещения каждого последующего блока зависит от результата определения предыдущих векторов кандидатов. В связи с этим диагональное расположение векторов кандидатов значительно усложняет алгоритм, в отличие от горизонтального расположения, поскольку количество блоков, лежащих на диагонали, изменяется.

В алгоритме 3DRS используются так называемые кандидаты обновления, которые генерируются из пространственных кандидатов $S1$ и $S2$ путем добавления случайных смещений. Генерация случайной последовательности не повторяющихся чисел в параллельном алгоритме сталкивается со сложностью практической реализации, связанной с необходимостью одновременного выполнения параллельных вычислений. В модифицированном алгоритме вместо случайных значений к каждому вектору кандидату прибавляется смещение в диапазоне от -2 до 2 пикселей по вертикальному и горизонтальному направлениям. При отсутствии векторов кандидатов (например, для первой строки), поиск перемещения производится относительно перемещения самого блока. Горизонтальное расположение блоков позволяет параллельно выполнять обработку каждого блока в пределах одной строки поля векторов перемещений.

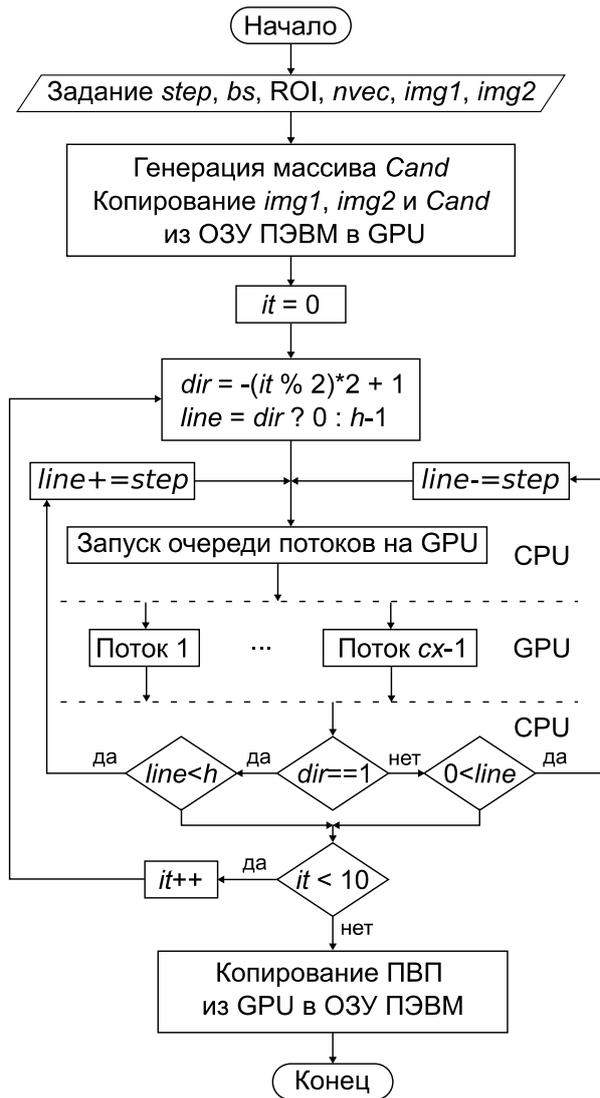


Рисунок 4 – Параллельный алгоритм определения полей векторов перемещений

чисто программной последовательной реализацией алгоритма DRS. Это связано с тем, что программа задействует большее количество ядер видеокарты при параллельном расчете перемещений в строке. Применение векторных операций позволило снизить временные затраты. Чем больше размер типа векторных данных, тем эффективнее используется графический процессор (рисунок 5, б).

Учитывая особенности предложенного DRS алгоритма и ограничения, накладываемые аппаратом параллельных вычислений, был разработан параллельный алгоритм построения полей векторов перемещений PDRS (рисунок 4). Алгоритм был реализован с использованием языка программирования OpenCL для выполнения на графических процессорах AMD Radeon.

Тестирование алгоритмов проводили на изображениях размером 3456×5184 . Размер ядра корреляции задавался равным 64×64 пиксела, шаг между векторами – 48 пикселей. В алгоритме использовалось 10 итераций сканирования. Для построения полей векторов перемещений на центральных процессорах Intel Core i5 и i7 алгоритм был реализован на языке программирования C++. Результаты тестирования показали, что применение графических процессоров позволяет значительно снизить время вычисления полей векторов перемещений (рисунок 5, а). Снижение времени при заданных параметрах расчета и для данных изображений составило ~ 27 раз. При увеличении плотности векторного поля в 3 раза (шаг между векторами равен 16 пикселям) и, соответственно, количества векторов в строках, временные затраты при использовании параллельного алгоритма PDRS были снижены в 63 раза по сравнению с

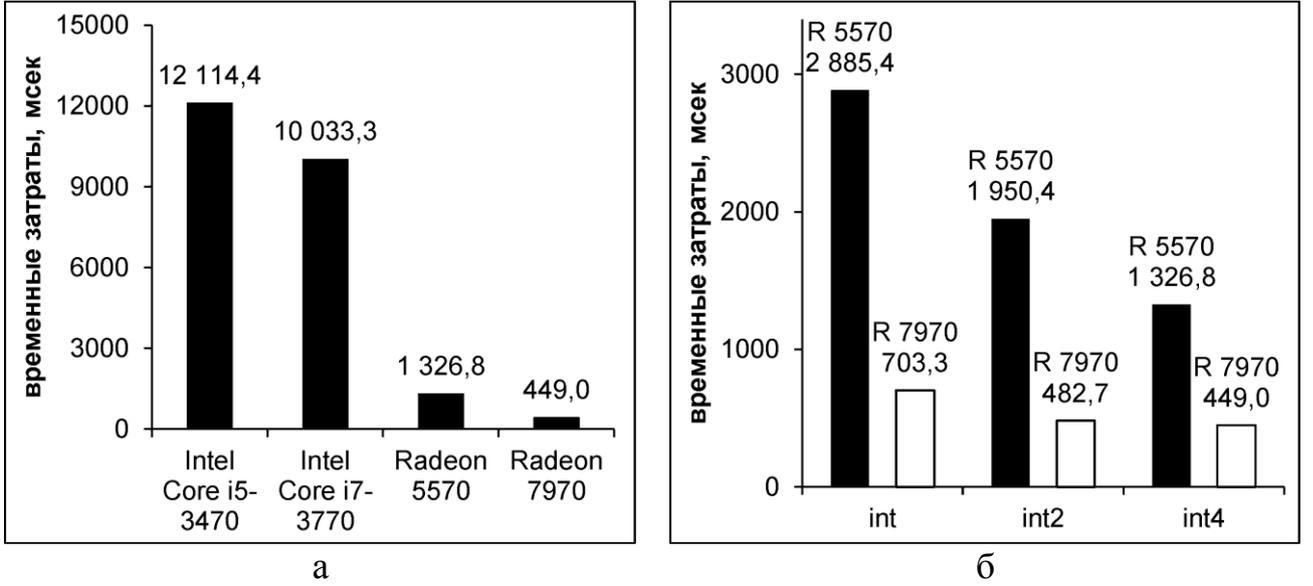


Рисунок 5 – Временные затраты на построение полей векторов перемещений: время построения полного векторного поля (а); то же с применением различных векторных операций (б)

Определение перемещений на границах объектов часто затруднено вследствие значительного искажения формы взаимно-корреляционной функции. Использование весовых коэффициентов позволяет повысить устойчивость определения перемещений. Взвешенную меру подобия можно записать следующим образом

$$wSAD = \sum_{i,j} w_{i,j} |I(i, j, t) - I(i + u, j + v, t + 1)| \quad (11)$$

Взвешенный алгоритм Лукаса-Канаде

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i,j} w_{i,j} I_x^2(i, j) & \sum_{i,j} w_{i,j} I_x(i, j) I_y(i, j) \\ \sum_{i,j} w_{i,j} I_x(i, j) I_y(i, j) & \sum_{i,j} w_{i,j} I_y^2(i, j) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i,j} w_{i,j} I_x(i, j) I_t(i, j) \\ -\sum_{i,j} w_{i,j} I_y(i, j) I_t(i, j) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $w_{i,j}$ – коэффициенты весовой функции.

Весовая функция определяется следующим образом:

$$w = w_c w_d, w_c = e^{-\frac{(I(\bar{i}) - I(\bar{i} + \Delta\bar{i}))^2}{2\sigma_c^2}}, \quad (13)$$

где w_c – весовая функция для данных о яркости, w_d – весовая функция для данных о расстоянии. Весовая функция w_d определялась размером ядра корреляции по нормальному распределению. Для вычисления параметра σ_c предлагается использовать следующий подход, позволяющий адаптивно подбирать его значения:

$$\sigma_c = \max_{\Delta\bar{i} \in (N, N)} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\partial}{\partial x} |I(\bar{i}) - I(\bar{i} + \Delta\bar{i})| \cdot \frac{\partial}{\partial y} |I(\bar{i}) - I(\bar{i} + \Delta\bar{i})| \right|}, \quad (14)$$

где $I(\bar{i} + \Delta\bar{i})$ – яркость пикселя в точке $\bar{i} + \Delta\bar{i} = (i + di, j + dj)$, $di \in \left(-\frac{N}{2}; \frac{N}{2}\right)$, $dj \in \left(-\frac{N}{2}; \frac{N}{2}\right)$, N – размер участка изображения (апертура билатерального фильтра).

Это позволяет сформировать «рабочую» весовую функцию с целью уменьшения влияния значений удалённых пикселей конечное значение, а также увеличить чувствительность весовой функции к локальным перепадам яркости.

Для достижения большей эффективности определения перемещений предлагается вычислять весовые функции с учетом обоих изображений в анализируемой паре:

$$w = w_{c_t} w_{d_t} w_{c_{t+1}} w_{d_{t+1}}, \quad (15)$$

где w_{c_t} , w_{d_t} – весовые функции изображения в момент времени t ; $w_{c_{t+1}}$, $w_{d_{t+1}}$ – весовые функции изображения в момент времени $t+1$.

Оценка эффективности применения весовых коэффициентов проведена при обработке тестовых изображений из специализированной публичной базы Middlebury benchmark. Алгоритмы SF (Simple Flow) и Classic+NL, основанные на поиске минимума меры подобия с применением корректировочных весовых коэффициентов, были доступны в виде открытого кода и использовались в работе для сопоставления с предложенным алгоритмом.

Сравнение данных (таблица 2) показывает, что предложенный подход awwLK-awwSAD, в среднем, обеспечивает более высокое «качество» определения оптического потока (оцениваемое субъективно при сравнении их полей) и меньшую среднюю ошибку определения перемещения (AEE), по сравнению с SimpleFlow. В то же время, судя по величине параметра AEE для ряда пар изображений, алгоритм awwLK-awwSAD уступает подходу Classic+NL. Несмотря на это, на полученных полях оптического потока видно, что метод awwLK-awwSAD позволяет получить более «гладкие» перемещения в пределах отдельных объектов и обеспечивает «сохранение» более четко выраженных границ.

Таблица 2 – Средняя ошибка определения конечной точки AEE оптического потока

Алгоритм	Пара тестовых изображений								Суммарная AEE
	Dimetrodon	Grove2	Grove3	Hydrangea	RubberWhale	Urban2	Urban3	Venus	
SAD	0,452	0,541	1,031	0,410	0,407	1,123	2,201	0,528	6,693
awwLK-awwSAD	0,246	0,190	0,567	0,220	0,146	0,761	1,917	0,397	4,444
Classic+NL	0,272	0,301	0,861	0,228	0,145	0,906	1,165	0,491	4,369
SimpleFlow	0,298	0,412	0,851	0,321	0,282	0,808	1,890	0,259	5,120

В четвертой главе рассмотрены вопросы проектирования системы технического стереозрения (СТСЗ) для задачи оценки деформации различных инженерных объектов и элементов конструкций. Для реализации такой системы использован модифицированный инкрементальный алгоритм построения полей векторов перемещений. Проведено тестирование различных предложенных алгоритмов, определяющих функционирование системы стереозрения.

Разработанная СТСЗ для задач оценки деформации включает следующие этапы функционирования:

1. Калибровка камер, включающая поиск узловых точек калибровочного шаблона на изображениях;
2. Ректификация изображений стереопар;
3. Вычисление карт диспаратности;

4. Восстановление трехмерных координат точек стереопары;
5. Вычисление трехмерных перемещений точек;
6. Вычисление деформаций для задач экспериментальной механики.

Процесс калибровки стереосистемы можно разделить на следующие операции:

- выделение характеристических точек на изображениях стереопары;
- установление соответствия между характеристическими точками на изображениях стереопары;
- расчет внутренних и внешних параметров камер стереосистемы по установленным соответствиям между характеристическими точками.

Задача калибровки напрямую зависит от точности обнаружения устойчивых характеристик (атрибутов) калибровочного шаблона (КШ), которые мало подвержены изменениям и легко выделяются на нем. Полученные в процессе калибровки системы стереозрения внутренние и внешние параметры камер, используются далее для ректификации пар изображений.

Ректификация изображений – процесс анализа изображений, в результате которого получаются пары изображений, согласованных эпиполярных проекций. Обычно ректификацию совмещают с коррекцией искажений, вносимых оптической системой.

После того как изображения ректифицированы, выполняют поиск соответствующих пар точек. Для каждого пикселя левого изображения с координатами (x_0, y_0) выполняется поиск пикселя на правом изображении. При этом предполагается, что пиксель на правом изображении должен иметь координаты $(x_0 - dx, y_0)$, где dx - величина, называемая диспаратностью. Величины диспаратности точек изображений могут быть определены с помощью любого из алгоритмов вычисления поля векторов перемещений. В таком случае поле векторов перемещений, определенное по паре изображений с левой и правой камер, будет представлять собой карту диспаратности.

Определение пространственных координат заданных точек объекта по последовательности стереопар подразумевает определение положения этих точек на изображениях. Как было отмечено ранее, определение перемещения точек между начальным и текущим изображением может быть затруднено по причине значительной деформации объекта, изменения условий съемки, положения объекта в пространстве и т. д. Ранее был предложен инкрементальный алгоритм, позволявший сопоставлять ближайшие по времени кадры в последовательности изображений. Было предложено модифицировать алгоритм, расширив его для обработки последовательности стереопар, а также избавиться от его основного недостатка, а именно накопления ошибки перемещений (рисунок 6). В схеме использована сквозная последовательная нумерация изображений стереопар. Для изображений левой камеры: $I_0, I_2 \dots I_{2i}$ и для изображений правой камеры: $I_1, I_3 \dots I_{2i+1}$. Векторные поля обозначаются в соответствии со стереопарами: $VF\{a\}\{b\}P$, $VF\{a\}\{b\}S$, где $\{a\}$, $\{b\}$ – номера изображений пары, P – пиксельная точность, S – субпиксельная точность.

Стереопара, соответствующая начальному моменту времени, обозначена как 0-я стереопара, изображения I_0 и I_1 (рисунок 6, а). На первом этапе определя-

ется поле векторов перемещений с пиксельной точностью, используя алгоритм, основанный на быстром преобразовании Фурье и обозначенный на схеме как VFP. Далее, поле векторов уточняется до субпиксельной точности (блок VFS) с использованием дифференциального алгоритма. Поле векторов перемещений VF01S между кадрами стереопары является картой диспаратности, а также используется как начальное приближение для определения перемещений в следующей паре I1, I3 с пиксельной точностью. Блоки VFP используют предыдущее и текущее изображения для определения поля векторов перемещений. Перемещения определяются отдельно для левых изображений $I\{2(i-1)\}$, $I\{2i\}$ и правых $I\{2(i-1)+1\}$, $I\{2i+1\}$ (рисунок 6, а, б). Также используется векторное поле, рассчитанное для предыдущей стереопары, перемещения которого используются для определения положения ядра корреляции.

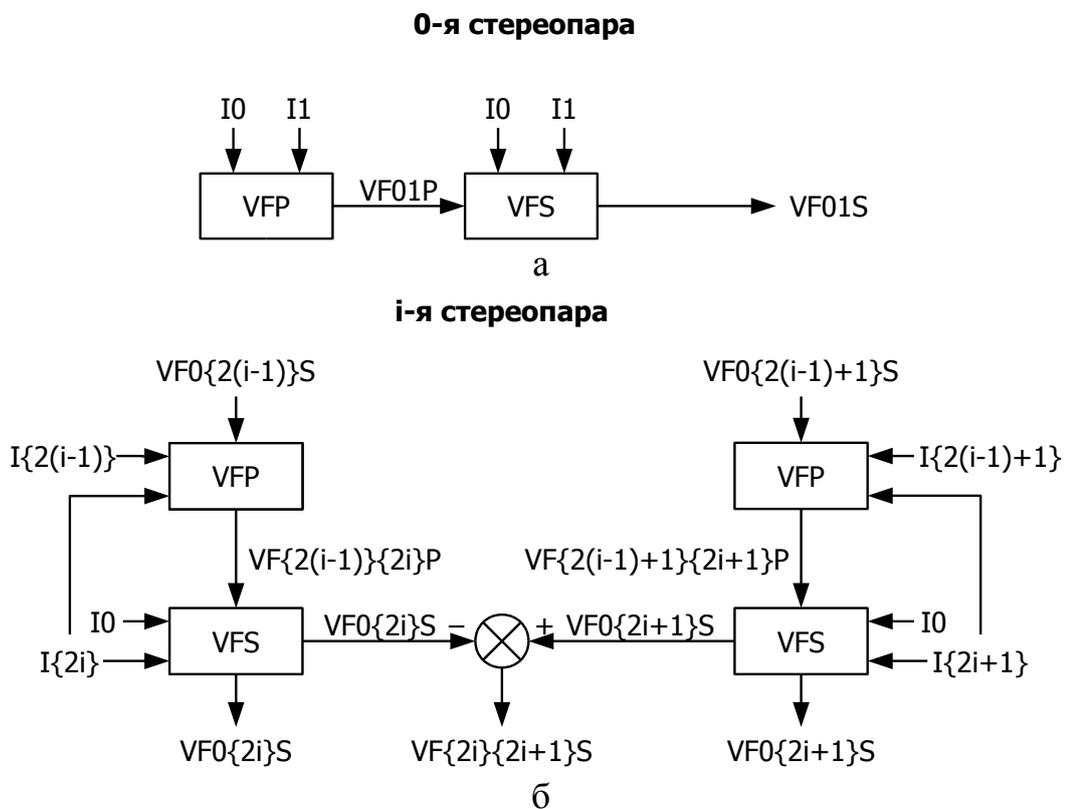


Рисунок 6 – Схема инкрементального алгоритма определения полей векторов перемещений для последовательностей стереопар

Перемещения с субпиксельной точностью (блоки VFS) определяются по изображению I0 (начальное левое изображение) и текущему изображению стереопары, левому $I\{2i\}$, либо правому $I\{2i+1\}$. Для начального приближения двух первых элементов p_0 и p_1 искомого вектора P

$$\begin{cases} \tilde{x}(x, y) = p_0 + p_2x + p_4y + p_6xy \\ \tilde{y}(x, y) = p_1 + p_3x + p_5y + p_7xy \end{cases} \quad (16)$$

используется векторное поле с пиксельной точностью $VF\{2(i-1)\}\{2i\}P$, либо $VF\{2(i-1)+1\}\{2i+1\}P$ (рисунок 6, б).

Вычитая поле $V_{F0\{2i\}S}$ из $V_{F0\{2i+1\}S}$, получаем векторное поле $V_{F\{2i\}\{2i+1\}S}$, которое соответствует карте диспаратности i -й стереопары изображений $I\{2i\}$ и $I\{2i+1\}$.

Значения глубины обратно пропорциональны величине диспаратности. Зависимость между диспаратностью и глубиной можно выразить следующим способом:

$$\frac{T - dx}{Z - f} = \frac{T}{Z} \rightarrow Z = \frac{fT}{dx} \quad (17)$$

где T – расстояние между камерами, Z – глубина или расстояние до объекта, f – расстояние до плоскости проекции.

Таким образом, в каждый момент времени по паре кадров с левой и правой камер мы получаем карту диспаратности и карту глубины, т.е. массив точек в пространственных координатах. Полученный в начальный момент времени зафиксированный левой камерой кадр, примем за опорный. Зная, что в каждый момент времени мы обеспечиваем слежение за одними и теми же точками, определенными по сетке опорного кадра, можно вычислить перемещения точек в пространстве. Вычисление деформации поверхности объекта в пространстве выполняется через расчет плоских деформаций в каждой ее точке, входящей в область интереса. Для каждой точки плоская деформация вычисляется в малой её окрестности.

Алгоритм вычисления плоской деформации в точке состоит из следующих этапов:

1. По N точкам окрестности $P_1 \dots P_n$ находится функция $z(x, y)$, аппроксимирующая исходную поверхность. Порядок функции $z(x, y)$ берется > 1 , например биквадратичная функция при радиусе окрестности равном 1, т.е. для области размером 3×3 пикселя.

2. Определяется касательная плоскость к $z(x, y)$ в точке $P_m(x_m, y_m, z_m)$.

3. Строится нормаль \bar{n} к поверхности и касательный вектор \bar{t} в точке P_m .

4. Находится вектор бинормали \bar{b} , ориентированный перпендикулярно \bar{t} и \bar{n} .

5. Вектора \bar{t} , \bar{b} , \bar{n} образуют базис E ; вектора \bar{t} и \bar{b} лежат в касательной плоскости z_t .

6. Определяются проекции точек окрестности $P_1 \dots P_n$ на касательную плоскость. Проекцией точки на плоскость является либо сама точка, если она лежит в заданной плоскости, либо основание перпендикуляра, опущенного из этой точки на заданную плоскость. Они обозначаются как $T_1 \dots T_n$, т.е. точки пересечения перпендикуляров из точек $P_1 \dots P_n$ на плоскость z_t .

7. Координаты точек $T_1 \dots T_n$ преобразуются к базису E . Поскольку точки $T_1 \dots T_n$ лежат в касательной плоскости z_t , то координата z_e будет нулевой. В результате получаем набор координат (x_e, y_e) для всех точек $T_1 \dots T_n$ кроме центральной точки T_m , т.к. её координаты в базисе E являются нулевыми $(0, 0, 0)$. В результате получаем набор точек в базисах E (исходного состояния) и E' (деформированного состояния) для всех точек в области интереса.

8. Поскольку центры базисов E и E' совпадают, смещение между ними равно нулю. Преобразование между базисами E и E' является аффинным. Имея набор

координат точек (x_e, y_e) и $(x_{e'}, y_{e'})$, полученных в п. 7, матрицу аффинных преобразований можно найти с помощью метода наименьших квадратов. Полученная матрица аффинных преобразований будет определять тензоры деформации.

9. Главные деформации могут быть получены из матрицы аффинных преобразований с помощью сингулярного разложения.

Повторяя пп. 1-9 для каждой точки поверхности, получаем рассчитанные поля компонент деформации.

Разработанный алгоритм обработки изображений в СТСЗ был протестирован на модельных изображениях, отражающих как плоско-деформированную поверхность, так и внеплоскостные перемещения поверхности. Проведено сопоставление результатов расчета деформации в режиме моно- и стереозрения на модели изгиба тонкой пластины, опертой по краям. Такая модель выбрана, в первую очередь, по причине присутствия в ней внеплоскостных перемещений. Оценивали среднюю абсолютную ошибку вычисления продольного и поперечного тензора деформации (рисунок 7). Показано, что система с одной камерой не позволяет достоверно определять деформацию при наличии внеплоскостных перемещений. Ошибка вычисления компонент тензора деформации в случае системы с одной камерой на два порядка больше, чем при использовании системы стереозрения. Кроме того, в случае системы с одной камерой ошибка на порядок больше самой величины деформации.

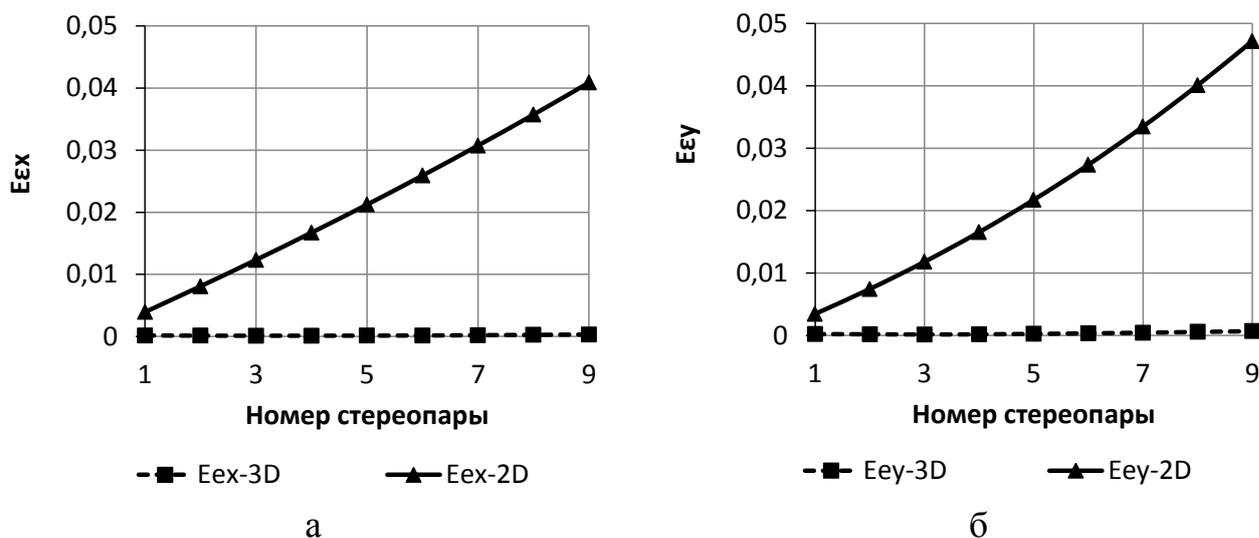


Рисунок 7 – Зависимость ошибки определения компонент тензора деформации E_{ex} (а) и E_{ey} (б) от номера стереопары для системы технического зрения с одной (2D) и двумя камерами (3D)

Обобщая разработанную ранее систему технического зрения, была предложена схема обработки информации в системах оценки деформации (рисунок 8). Конечным результатом работы системы, включающей все указанные блоки, является вектор параметров модели деформационного поведения материала, из которого определяются свойства или механическое состояние материала:

$$\hat{p} = \arg \min_p \{F(p)\} \quad (18)$$

Построение конкретной системы оценки деформации зависит от целей и задач, которые такая система выполняет, поэтому часть блоков может быть исключена, а результатом работы будет являться поле векторов перемещений, поле деформации или другие данные.

Одним из основных этапов в работе любой системы оценки деформации является процесс сбора данных, в данном случае это запись изображений оптического образа поверхности объекта измерения (ОИ) с помощью видеодатчика. Количество видеодатчиков, их пространственная конфигурация, требования к их разрешающей способности, спектральной чувствительности, быстродействию определяется решаемой задачей. В зависимости от назначения системы процесс записи может быть синхронизирован с испытательной машиной, а также с системой позиционирования видеодатчика. При исследовании процессов разрушения с использованием оптической системы на базе микроскопа, часто требуется перемещать оптическую систему для слежения за местом локализации разрушения. Полученные изображения сохраняются с использованием системы хранения данных, в качестве которой может выступать физический носитель информации (жесткий диск, флэш память, оперативная память) или сетевой с использованием различных протоколов передачи данных.

Калибровка видеодатчиков необходима для сопоставления физических пространственных величин с таковыми, определяемыми системой оценки деформации.

Построение поля перемещений $U(X)$ является центральным алгоритмом в обработке информации в оптическом методе оценки деформации, и основано на методе корреляции цифровых изображений. Задание опорных точек чаще всего осуществляется в виде регулярной сетки. Для задач, связанных с сопоставлением или аппроксимацией конечно-элементной модели, сетка может быть нерегулярной. Точность построения поля векторов перемещений δ зависит от контрастности и характера спекла $I(X)$, размера апертуры S , наличия шума на изображении σ_N и др. Время построения поля определяет применимость конечной системы для задач оценки свойств материала или механического состояния. Применение сложных итеративных алгоритмов, включающих моделирование методом конечных элементов и пространственно-временную регуляризацию, может сказываться на оперативности получения результата. Время обработки изображений зависит от разрешения изображений N и размера апертуры S .

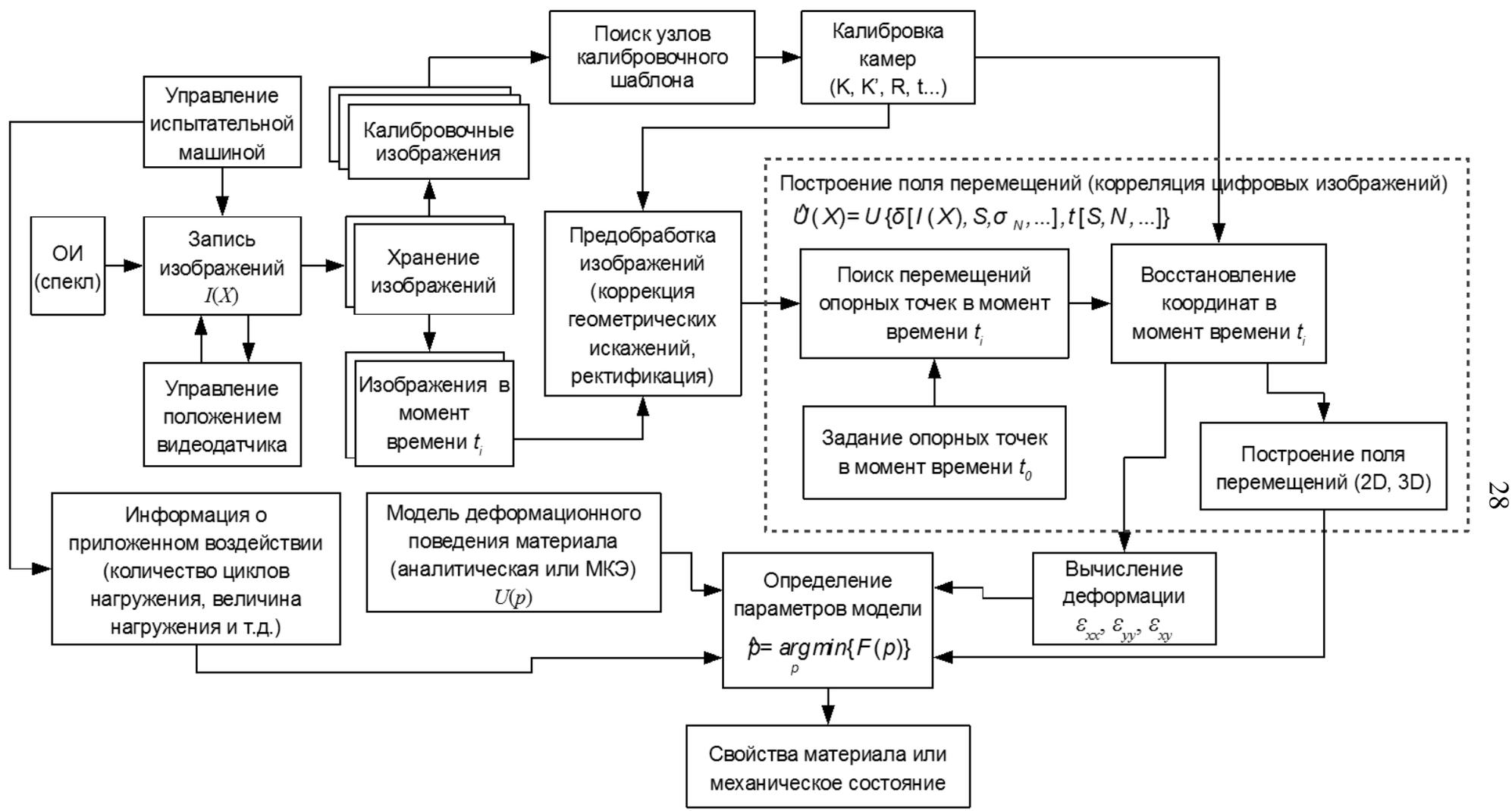


Рисунок 8 – Структурная схема обработки информации в оптической системе измерения деформации. $U(X)$ – поле векторов перемещений, δ – ошибка определения перемещений, $I(X)$ – функция яркости изображений, S - размер апертуры, σ_N – дисперсия шума, N - разрешение изображений, $U(p)$ – модельное поле векторов перемещений, p – вектор параметров модели

Деформация в зависимости от задачи, может определяться для плоского и пространственного поля перемещений. Вычисление полей деформации производится путем определения производных от перемещений обычно с использованием численного дифференцирования или по предложенному ранее алгоритму.

Решение задачи определения свойств материала осуществляется с использованием модели его деформационного поведения. Модель может быть записана в аналитическом или конечно-элементном виде. Как правило, определение параметров модели заключается в аппроксимации экспериментальных полей перемещений и (или) полей деформации заданной моделью. Кроме непосредственного определения параметров модели в таком случае на выходе можно получить более гладкие поля деформаций, получение которых невозможно при численном дифференцировании.

В заключительной пятой главе приведены результаты практического применения проведенных исследований. Разработанная система технического стереозрения (СТСЗ) применялась в различных областях исследований и разработок.

В частности, разработанная система использовалась в ходе выполнения НИР «Исследование возможности применения встроенных методов неразрушающего контроля для металлических и полимерных композиционных материалов» по договору между Филиалом ПАО Авиационная холдинговая компания «Сухой» «ОКБ Сухого» и ИФПМ СО РАН. Были проведены эксперименты по исследованию деформационного поведения образцов из монолитных композиционных (углепластиковых) материалов и образцов с сотовым заполнением при а) статическом и б) циклическом растяжении, а также в) с нанесенными ударными повреждениями.

В рамках выполнения НИР по проекту РФФИ 15-08-05818_А «Многоуровневое описание малоциклового усталости поликристаллических и наноструктурных сред с учетом ротационных мод деформации» в ИФПМ СО РАН при научно-техническом сотрудничестве с компанией Bangalore Integrated System Solutions (Biss, г. Бангалор, Индия) а также Национальным исследовательским Томским политехническим университетом, проводили исследования усталостного разрушения образцов авиационного алюминиевого сплава А2024 в условиях приложения единичных циклов перегрузки/разгрузки. В результате проведенных с помощью СТСЗ исследований были экспериментально получены зависимости скорости роста трещины и ее длины как функции количества циклов нагружения. Это позволило разработать методику оптического измерения локальной деформации, которая оказывается крайне чувствительной, позволяя на зависимости «Нагрузка-деформация» фиксировать формирование петель механического гистерезиса. Использование датчика раскрытия, устанавливаемого на образце, в силу его гораздо меньшей чувствительности не позволяет, выявлять подобные процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная проблема разработки комплексного подхода к обработке информации в оптических системах оценки деформационного состояния материалов и их свойств, которая квалифицируется как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Основные выводы по работе, научные и прикладные разработки состоят в следующем:

1. Исследованы информативные параметры, на основании анализа значений которых можно проводить оценку механического состояния нагруженного материала по оптическим изображениям его поверхности. Показано, что все 4 реализованные методики расчета фрактальной размерности (ФР) позволяют получить оценку её значения, удовлетворительно совпадающую с заданными при моделировании. ФР может быть использована в качестве количественной меры рельефа на поверхности, однако необходимо оценивать и максимально исключать влияние шумов на результаты расчета, что может быть достигнуто за счет применения процедур фильтрации.

2. Проведено исследование влияния адаптивной билатеральной фильтрации на оценку модельных и экспериментальных оптических изображений с использованием фрактальной размерности. Предложено использовать параметр минимальной дисперсии $\min(D)$ для оценки уровня шума на изображении. Показана эффективность применения параметра $\min(D)$ для настройки оптической системы и выбора параметров адаптивной билатеральной фильтрации.

3. Проведено исследование по оценке величины наработки конструкционных материалов с помощью датчика деформации интегрального типа, основанное на изменении ряда информативных параметров. Определены наиболее чувствительные к изменению деформации меры (количественные характеристики) оптических изображений, к которым относятся информационная энтропия H , среднеквадратическая ошибка MSE и их комбинация $H-MSE$. Указанные меры обладают большей чувствительностью в разных диапазонах величины циклической наработки: H – на начальных этапах циклического нагружения; MSE – на этапах, предшествующих разрушению; в то время как $H-MSE$, как комбинированный параметр, является чувствительным во всем диапазоне циклических испытаний.

4. Предложен алгоритм автоматического выбора размера апертуры корреляционного алгоритма. По результатам его тестирования на сериях изображений с различным характером текстуры показано, что каждому типу исследованных текстур соответствует свой размер ядра корреляции, который обеспечивает минимальную ошибку определения деформации.

5. Разработан инкрементальный алгоритм построения векторных полей, основанный на накоплении перемещений между ближайшими парами в серии изображений. Алгоритм позволяет определять перемещения при изменении яркостной картины изображения более чем на 50%.

6. С целью уменьшения вычислительных затрат проведено исследование и показана эффективность применения алгоритма определения перемещений, осно-

ванного на трехмерном рекурсивном поиске (3DRS). На основе 3DRS алгоритма разработан иерархический 3DRS алгоритм (3DRS-P). Объединение двух данных алгоритмов позволяет повысить быстродействие в 10 раз и помехоустойчивость более чем в два раза.

7. Разработан параллельный алгоритм построения полей векторов перемещений (PDRS), реализованный на основе алгоритма рекурсивного поиска и ограничений, накладываемых аппаратом параллельных вычислений. PDRS реализован с использованием языка программирования OpenCL для выполнения на графических процессорах AMD Radeon. Применение разработанного алгоритма обеспечивает снижение времени построения векторного поля в ≈ 27 раз по сравнению с последовательным алгоритмом DRS (при заданных параметрах расчета на изображениях размером 3456×5184).

8. Разработан алгоритм определения перемещений, основанный на применении весовых коэффициентов билатерального фильтра, который позволяет с большей устойчивостью определять перемещения, прежде всего на контрастных границах движущихся объектов на изображениях (более чем на 8%). Предложен способ вычисления коэффициентов билатерального фильтра по обоим изображениям используемой пары, что позволило снизить ошибку субпиксельного алгоритма более чем на 13% на границах и в зонах перекрытий объектов. Продемонстрирована возможность повышения эффективности применения алгоритма Лукаса-Канаде за счет введения взвешенной меры подобия.

9. Для созданной лабораторной системы технического стереозрения для оценки пространственных перемещений и оценки деформации разработан алгоритм ее работы. Алгоритм включает следующие этапы: 1) Калибровка камер оптической системы, основанная на выделении узловых точек калибровочного шаблона; 2) Определение карты диспаратности между ректифицированными изображениями стереопары. В основе определения карты диспаратности лежит модифицированный инкрементальный алгоритм определения перемещений на серии стереопар. Основное преимущество предложенного алгоритма заключается в отсутствии накопления ошибки определения перемещения; 3) Вычисление деформации на поверхности пространственного объекта, путем использования восстановленных профилей поверхности объекта из карт диспаратности.

10. Проведено тестирование лабораторной СТСЗ на сериях стереопар, отражающих изменение положения объекта в пространстве, а также плоскостные и внеплоскостные перемещения. Показано, что ошибка определения пространственных координат не превышает 0,75 пространственных единиц при угле между осями камер 20° . Предложенные алгоритмы позволяют определять деформацию с ошибкой, не превышающей $4 \cdot 10^{-3}$. Экспериментально показано, что ошибка вычисления компонент тензора деформации в случае системы с одной камерой может превышать более чем на один порядок, по сравнению с использованием разработанной системы стереозрения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Любутин, П.С. Разработка и исследование алгоритмов обработки изображений поверхности для оценки деформации твердых тел / С.В. Панин, В.И. Сыряжкин, П.С. Любутин // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 2. – С. 44-58. (ВАК)
2. Любутин, П.С. Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности / С.В. Панин, П.С. Любутин // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 2. – С. 69-80. (ВАК)
3. Любутин, П.С. Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико-телевизионным методом / П.С. Любутин, С.В. Панин // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 52-66. (ВАК)
4. Любутин, П.С. Измерение деформации на мезоуровне путем анализа оптических изображений поверхности нагруженных твердых тел / П.С. Любутин, С.В. Панин // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 6. – С. 158-164. (Lyubutin, P.S. Mesoscale measurement of strains by analyzing optical images of the surface of loaded solids / P.S. Lyubutin, S. V. Panin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2006. – Vol. 47, N 6. – P. 905-910). (ВАК/WoS/Scopus)
5. Любутин, П.С. Оценка деформаций на мезоуровне при распространении усталостной трещины на основе количественной обработки полей векторов перемещений с помощью оптико-телевизионной системы / С.В. Панин, Ю.П. Стефанов, П.С. Любутин // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 45-53. (ВАК)
6. Любутин, П.С. Исследование деформации и разрушения по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, О.В. Башков, В.В. Гренке, И.В. Шакиров, С.А. Хижняк // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, № 9. – С. 50-59. (ВАК)
7. Любутин, П.С. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии / В.Е. Панин, С.В. Панин, А.В. Бяков, М.В. Бурков, П.С. Любутин // Контроль. Диагностика. – 2011. – Т. 161, № 11. – С. 56-62. (ВАК)
8. Любутин, П.С. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. I. Образцы с отверстиями различного диаметра / С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, О.В. Башков // Дефектоскопия. – 2011. – № 9. – С. 47-61. (Lyubutin, P.S. Staging of a localized plastic deformation during extension of D16AT alloy specimens based on the data of acoustic emission, mapping of surface deformations, and strain gauging. I. Specimens with holes of different diameters / S.V. Panin, A.V. Vyakov, P.S. Lyubutin, O.V. Bashkov // Russian Jour-

nal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47, N 9. – P. 611-622). (ВАК/WoS/Scopus)

9. Любутин, П.С. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. II. Образцы с надпилами различной глубины / С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, О.В. Башков // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 43-54. (Lyubutin, P.S. Staging of a localized plastic deformation upon the tension of Д16АТ alloy specimens on the basis of acoustic emission, surface deformation mapping, and strain gauging data. II. Specimens with notches of different depths / S. V. Panin, A. V. Byakov, P.S. Lyubutin, O. V. Bashkov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47, N 12. – P. 815-823). (ВАК/WoS/Scopus)

10. Любутин, П.С. Стадийность локализованной деформации при растяжении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с отверстиями различного диаметра по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков, П.С. Любутин, С.А. Хижняк // Дефектоскопия. – 2012. – № 10. – С. 57-70. (Lyubutin, P.S. Staging of a localized deformation during tension of specimens of a carbon-carbon composite material with holes of different diameters according to acoustic-emission, surface-deformation mapping, and strain-gauging data / S.V. Panin, M.V. Burkov, A.V. Byakov, P.S. Lyubutin, S.A. Khizhnyak // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2012. – Vol. 48, N 10). (ВАК/WoS/Scopus)

11. Любутин, П.С. Применение фрактальной размерности для оценки изображений поверхности, получаемых различными датчиками / С.В. Панин, Ю.А. Алтухов, П.С. Любутин, А.В. Бяков, С.А. Хижняк // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 42–49. (Lyubutin, P.S. Application of the fractal dimension for estimating surface images obtained by various detectors / S. V. Panin, Y.A. Altukhov, P.S. Lyubutin, A. V. Byakov, S.A. Khizhnyak // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – Vol. 49, N 1. – P. 34-40). (ВАК/Scopus)

12. Любутин, П.С. Исследование эффективности алгоритмов фильтрации векторных полей при оценке деформации материалов методом корреляции цифровых изображений / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любутин // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 57-67. (Lyubutin, P. S. Efficiency of vector field filtration algorithms in estimating material strain by the method of digital image correlation / S. V. Panin, V. V. Titkov, P.S. Lyubutin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – Vol. 49, N 2. – P. 155-163). (ВАК/WoS/Scopus)

13. Любутин, П.С. Влияние билатеральной фильтрации на фрактальную оценку оптических изображений поверхности нагруженных материалов / С.В. Панин, Ю.А. Алтухов, П.С. Любутин, А.В. Бяков, С.А. Хижняк // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 25–35. (Lyubutin, P.S. Effect of bilateral filtration on fractal estimation of optical images of loaded material surfaces / S. V. Panin, Y.A. Altukhov, P.S. Lyubutin, A. V. Byakov, S.A. Khizhnyak // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – Vol. 49, N 3. – P. 234-242). (ВАК/Scopus)

14. Любутин, П.С. Снижение вычислительных затрат с применением алгоритма трёхмерного рекурсивного поиска при построении векторов перемещений в

оптическом методе оценки деформации / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любутин // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18, № 5. – С. 91-101. (ВАК)

15. Любутин, П.С. Применение датчиков деформации интегрального типа для оценки усталостной поврежденности углеродных композитов / С.В. Панин, М.В. Бурков, П.С. Любутин, Ю.А. Алтухов, С.А. Хижняк // Дефектоскопия. – 2014. – № 5. – С. 47-59. (Lyubutin, P.S. Application of integral-type deformation pickups for evaluating the fatigue damage of carbon composites / S. V. Panin, M. V. Burkov, P.S. Lyubutin, Y.A. Altukhov, S.A. Khizhnyak // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50, N 5. – P. 288-298). (ВАК/WoS/Scopus)

16. Любутин, П.С. Сглаживание векторных полей с использованием поверхности Безье при оценке деформации методом корреляции цифровых изображений / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любутин // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 74-81. (Lyubutin, P. S. Smoothing of vector fields by using the Bezier surface for strain estimation by the method of digital image correlation / S. V. Panin, V. V. Titkov, P.S. Lyubutin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014. – Vol. 50, N 1. – P. 61-67). (ВАК/Scopus)

17. Любутин, П.С. Инкрементный подход к определению перемещений фрагментов изображений при построении векторных полей / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любутин // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 39-49. (Lyubutin, P. S. Incremental approach to determination of image fragment displacements during vector field construction / S. V. Panin, V. V. Titkov, P.S. Lyubutin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014. – Vol. 50, N 2. – P. 139-147). (ВАК/Scopus)

18. Любутин, П.С. Исследование различных критериев оценки серии оптических изображений в методе датчика деформации интегрального типа / С.В. Панин, П.С. Любутин, М.В. Бурков, Ю.А. Алтухов, С.А. Хижняк, В.П. Кузнецов // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19, № 3. – С. 103-117. (ВАК)

19. Любутин, П.С. Применение фильтрации в задаче распознавания узловых точек калибровочного шаблона / С.В. Панин, В.О. Чемезов, П.С. Любутин // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 61-68. (ВАК)

20. Любутин, П.С. Оценка наработки УКМ с разной глубиной надпила с помощью датчика деформации интегрального типа. Ч. 1. Критерии качества изображений / С.В. Панин, М.В. Бурков, П.С. Любутин, А.В. Еремин, С.А. Хижняк // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/3. – С. 192-197. (ВАК)

21. Любутин, П.С. Оценка наработки УКМ с разной глубиной надпила с помощью датчика деформации интегрального типа. Ч. 2. Оценка рельефа на изображениях / С.В. Панин, М.В. Бурков, П.С. Любутин, А.В. Еремин, С.А. Хижняк // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/3. – С. 199-203. (ВАК)

22. Lyubutin, P.S. Application of aluminum foil for “strain sensing” at fatigue damage evaluation of carbon fiber composite / S. Panin, M. Burkov, P. Lyubutin, Y. Altukhov // Science China Physics, Mechanics and Astronomy. – 2014. – Vol. 57, N 1. – P. 59-64.(WoS/Scopus)

23. Lyubutin, P.S. Fatigue damage evaluation of carbon fiber composite using aluminum foil based strain sensors / S.V. Panin, M.V. Burkov, P.S. Lyubutin, Y.A. Al-tukhov, I.V. Shakirov // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2014. – Vol. 129. – P. 45-53. (WoS/Scopus)

24. Lyubutin, P.S. Estimation of the Kinetics of Fatigue Fracture by the Automated Analysis of Deformation Patterns on the Surfaces of Specimens with Central Holes / P.O. Marushchak, I.V. Konovalenko, S.V. Panin, P.S. Lyubutin, I.M. Danylyuk, M.A. Zhuravkov // *Materials Science*. – 2014. – Vol. 50, N 3. – P. 388-396. (WoS/Scopus)

25. Lyubutin, P.S. Application of meso- and fracture mechanics to material affected by a network of thermal fatigue cracks / S. V. Panin, P.O. Maruschak, P.S. Lyubutin, I. V. Konovalenko, B.B. Ovechkin // *International Journal of Fatigue*. – 2015. – Vol. 76. – P. 33-38. (BAK/WoS/Scopus)

26. Любу́тин, П.С. Развитие алгоритмов вычисления оптического потока в задаче оценки деформации твёрдых тел / П.С. Любу́тин // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 94-100. (Lyubutin, P.S. Development of optical flow computation algorithms for strain measurement of solids / P.S. Lyubutin // *Computer Optics*. – 2015. – Vol. 39, N 1. – P. 80-85). (BAK/WoS/Scopus)

27. Любу́тин, П.С. Автоматический выбор размера ядра корреляции в задаче оценки деформации материалов методом корреляции цифровых изображений / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любу́тин // *Вычислительные технологии*. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 65-78. (BAK)

28. Любу́тин, П.С. Выбор параметров алгоритма трёхмерного рекурсивного поиска при построении поля векторов перемещений с использованием иерархического подхода / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любу́тин // *Автометрия*. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 27-37. (Lyubutin, P.S. Selection of parameters of the three-dimensional recursive search algorithm in constructing displacement vector fields with the use of the hierarchical approach / S. V. Panin, V. V. Titkov, P.S. Lyubutin // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2015. – Vol. 51, N 2. – P. 124-133). (BAK/WoS/Scopus)

29. Любу́тин, П.С. Разработка акустико-оптического метода контроля состояния композиционных материалов при циклических испытаниях / А.В. Еремин, А.В. Бяков, П.С. Любу́тин, С.В. Панин // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2016. – Т. 59, № 7/2. – С. 49-55. (BAK)

30. Любу́тин, П.С. Выбор шага сетки векторного поля при оценке деформации методом корреляции цифровых изображений / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любу́тин, И.Ю. Поляков // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2016. – Т. 59, № 7/2. – С. 180-184. (BAK)

31. Любу́тин, П.С. Распознавание калибровочного шаблона в системах 3D-зрения для оценки деформации методом корреляции цифровых изображений / С.В. Панин, В.О. Чемезов, П.С. Любу́тин // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2016. – Т. 59, № 7/2. – С. 190-195. (BAK)

32. Любу́тин, П.С. Использование параллельных вычислений на графических процессорах AMD в задаче построения полей векторов перемещений / П.С. Любу́тин, С.В. Панин // *Вычислительные технологии*. – 2016. – Т. 21, № 6. – С. 47-58. (BAK)

33. Любутин, П.С. Метод определения характеристических точек изображения в системах стереозрения / С.В. Панин, В.О. Чемезов, П.С. Любутин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 224-230. (ВАК)

34. Любутин, П.С. Влияние величины шага сетки векторного поля перемещений на оценку деформации в методе корреляции цифровых изображений / С.В. Панин, В.В. Титков, П.С. Любутин // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58, № 3 (343). – С. 57-67. (Lyubutin, P.S. Effect of the mesh size of the vector displacement field on the strain estimate in the digital image correlation method / S. V. Panin, V. V. Titkov, P.S. Lyubutin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2017. – Vol. 58, N 3. – P. 425-434) (ВАК/WoS/Scopus)

35. Любутин, П.С. Алгоритм детектирования усталостной трещины и определения местоположения её вершины на оптических изображениях / С.В. Панин, В.О. Чемезов, П.С. Любутин, В.В. Титков // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 44-52. (Lyubutin, P.S. Algorithm of fatigue crack detection and determination of its tip position in optical images / S. V. Panin, V.O. Chemezov, P.S. Lyubutin, V. V. Titkov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2017. – Vol. 53, N 3. – P. 237-244). (ВАК/WoS/Scopus)

36. Любутин, П.С. Исследование эффективности применения билатерального фильтра в задачах вычисления оптического потока / В.В. Титков, С.В. Панин, П.С. Любутин, В.О. Чемезов // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 57-65. (Lyubutin, P.S. Efficiency of Bilateral Filter Application in Problems of Optical Flow Calculation / V. V. Titkov, S. V. Panin, P.S. Lyubutin, V.O. Chemezov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2017. – Vol. 53, N 6. – P. 583-590). (ВАК/WoS/Scopus)

37. Любутин, П.С. Комплексный алгоритм вычисления оптического потока с использованием взвешенной меры подобия / С.В. Панин, В.О. Чемезов, П.С. Любутин // Вычислительные технологии. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 80-94. (ВАК)

38. Любутин, П.С. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов / П.С. Любутин, С.В. Панин, В.В. Титков, А.В. Еремин, Р. Сундер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 87-107. (ВАК)

Монографии

39. Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / О.В. Башков, С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, С. Рамасуббу; Отв. ред. Н.А. Семашко. – Томск: Изд-во национального исследовательского Томского Политехнического Университета, 2014. – 301 с.

40. Панин, С.В. Анализ изображений в оптическом методе оценки деформации / С.В. Панин, П.С. Любутин, В.В. Титков; отв. ред. А.А. Светлаков; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т физики прочности и материаловедения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2017. – 288 с.

Регистрация программ для ЭВМ

41. Программа построения векторов смещений и оценки деформаций поверхностей твердых тел (Displacement Vector) : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004612276 Российская Федерация / Любутин П.С., Панин С.В., Сапожников С.В., Сырямкин В.И.; опубл. 06.10.2004.

42. Программа сглаживания векторных полей для оптического метода оценки деформации : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2013617436 Российская Федерация / Титков В.В., Любутин П.С., Панин С.В.; опубл. 14.08.2013.

43. Программа фильтрации векторов смещений для оценки деформации на поверхности нагруженных твердых тел : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2013617435 Российская Федерация / Титков В.В., Любутин П.С., Панин С.В.; опубл. 14.08.2013.

44. Программа оценки деформации материала и качества оптических изображений с помощью расчета статистических информативных параметров : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014612200 Российская Федерация / Алтухов Ю.А., Любутин П.С., Панин С.В.; опубл. 20.02.2014.

45. Программа построения векторов перемещений 3-х мерным рекурсивным поиском с настройкой параметров для оценки деформации на поверхности нагруженных твердых тел : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2015610384 Российская Федерация / Титков В.В., Любутин П.С., Панин С.В.; опубл. 12.01.2015.

46. Программа инкрементного построения векторных полей для оптического метода оценки деформации : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2015610343 Российская Федерация / Титков В.В., Любутин П.С., Панин С.В.; опубл. 12.01.2015.

47. Программа вычисления оптического потока методом трехмерного рекурсивного поиска с использованием взвешенной меры подобия : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2016662295 Российская Федерация / Чемезов В.О., Титков В.В., Любутин П.С., Панин С.В.; опубл. 07.11.2016.

48. Программа выделения характеристических точек калибровочного шаблона с адаптивной настройкой параметров : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2016610139 Российская Федерация / Чемезов В.О., Любутин П.С., Панин С.В.; опубл. 11.01.2016.

49. Программа определения положения трещины и координат ее вершины по оптическому потоку и пространственной информации : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611355 Российская Федерация / Чемезов В.О., Любутин П.С., Титков В.В., Еремин А.В., Панин С.В.; опубл. 02.02.2017.

50. Программа построения полей векторов перемещений с помощью глобального метода корреляции цифровых изображений на базе конечных элементов : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2018615798

Российская Федерация / Титков В.В., Любутин П.С., Панин С.В.;
опубл. 16.05.2018.

51. Программа для вычисления J-интеграла с использованием метода корреляции цифровых изображений при механических испытаниях материалов : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617601 Российская Федерация / Титков В.В., Любутин П.С., Еремин А.В., Панин С.В.;
опубл. 18.06.2019.