

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

УДК 53.082.53+681.2

На правах рукописи

ЗУЕВ
Владислав Олегович

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ ТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ**

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
Двойнишников Сергей Владимирович

Новосибирск – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Анализ адаптивных оптико-электронных методов контроля геометрии объектов.....	16
1.1. Адаптивные к нелинейным искажениям оптико-электронные методы контроля геометрии объектов.....	16
1.2. Адаптивные к светорассеивающим свойствам поверхности методы триангуляционного контроля геометрии объектов.....	24
1.3. Выводы по главе 1.....	31
Глава 2. Разработка адаптивных методов оптической триангуляции объектов в машиностроении и энергетике.....	32
2.1. Метод фазовой триангуляции с адаптацией к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейности приемно-передаточной функции ...	32
2.2. Адаптивный метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения.....	45
2.3. Адаптивный к текстуре поверхности комплекс методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций.....	53
2.4. Анализ погрешностей адаптивных методов оптической триангуляции объектов в машиностроении и энергетике.....	60
2.5. Выводы по главе 2.....	68
Глава 3. Практическая реализация адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике.....	69
3.1. Метод калибровки модулей адаптивной триангуляционной системы с регрессионным анализом фазовых распределений.....	69
3.2. Метод взаимной калибровки модулей адаптивной триангуляционной системы с дифференциальным анализом фазовых распределений.....	79
3.3. Аппаратная реализация адаптивных триангуляционных систем.....	83
3.4. Программное обеспечение адаптивных триангуляционных систем.....	94
3.5. Выводы по главе 3.....	102
Глава 4. Испытания адаптивных триангуляционных систем для точного	

контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике.....	103
4.1. Лабораторные испытания адаптивных триангуляционных систем.....	103
4.2. Производственные испытания адаптивных триангуляционных систем в машиностроении и энергетике	114
4.3. Выводы по главе 4	123
Заключение	125
Список использованных источников	127
Приложение. Справки об использовании результатов работы	139

Введение

Возможность прецизионного контроля геометрических параметров высокотехнологичных изделий является важнейшим фактором снижения рисков техногенных катастроф и повышения эффективности машиностроения, энергетики и других отраслей промышленности.

Приоритетное направление развития технологий прецизионного контроля геометрических параметров объектов в машиностроении и энергетике определено Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации. Для перехода к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, а также экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике требуется проведение высокоинформативных опытно-конструкторских испытаний на силовых стендах и научных исследований процессов тепломассообмена и обледенения объектов энергетики на климатических и аэродинамических стендах. Для решения данных задач необходимо применение оптико-электронных систем дистанционного контроля изменения геометрии исследуемого объекта, изолированного в рабочем участке экспериментального стенда с оптическим доступом. При этом достижение высокоточных результатов измерений требуется в условиях неоднородности показателя преломления, нелинейности траекторий оптических лучей, геометрических aberrаций оптических элементов, динамического изменения светорассеивающих свойств деформируемой поверхности и непредсказуемого искажения характера нелинейности приемно-передаточной функции. В результате используемые методы контроля геометрии должны быть адаптивны к светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности и нелинейным оптическим искажениям.

Для восстановления наиболее полной информации об изменении геометрии объекта требуется контроль пространственных деформаций участков его поверхности. Современные оптико-электронные методы

контроля пространственных деформаций основаны как на восстановлении трехмерной геометрии исследуемого объекта, так и на детектировании ее изменения без непосредственного измерения. К последнему классу относятся адаптивные к нелинейным оптическим искажениям и получившие существенное развитие методы на основе структурированного освещения [1-4] и оптической экстензометрии [5-9]. Однако из-за отсутствия возможности контроля пространственных деформаций в произвольных направлениях область их применения существенно ограничена.

Среди оптико-электронных методов измерения трехмерной геометрии объектов существенное развитие и широкое применение получили пассивные и активные подходы на основе лазерной дальнометрии [10-15], фотограмметрии [16-20], лазерной триангуляции [21-27] и оптической триангуляции с использованием структурированного освещения [28-38]. Общая проблема их применения для точного контроля геометрии объектов на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом связана с преломлениями оптических сигналов на границах стенок рабочего канала, без учета и компенсации которых результаты измерений имеют нелинейные систематические искажения. Среди оптико-электронных методов измерения трехмерной геометрии объектов возможность проведения калибровки, исключающей необходимость расчета коэффициентов преломления сред, компенсирующей нелинейность траекторий оптических лучей и геометрические aberrации оптических элементов, обеспечивают триангуляционные методы на основе структурированного освещения [30, 38]. Их развитие наиболее перспективно для разработки прецизионных систем дистанционного контроля трехмерной геометрии объектов на аэродинамических, климатических и силовых стендах закрытого типа с оптическим доступом.

Несмотря на давнюю историю и непрерывное развитие триангуляционных методов на основе структурированного освещения, в условиях нелинейных оптических искажений и динамического изменения

светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности проблема прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике полностью не решена.

Для расширения области контроля трехмерной геометрии исследуемого объекта применяют устойчивый к расфокусировке формирующей и регистрирующей оптических подсистем метод фазовой триангуляции [39-46]. Для минимизации погрешности расшифровки фазового распределения требуется компенсация нелинейности приемно-передаточной функции измерительного тракта и оптимизация параметров формирования и регистрации структурированных изображений в соответствии с светорассеивающими свойствами диагностируемой поверхности. Возможность восстановления характера нелинейности приемно-передаточной функции напрямую с помощью линейного увеличения яркости равномерного изображения источника [47-49] и сохранения ее преобразования в регистрируемые приемником значения интенсивности существенно ограничена. Это связано с ростом отклонения данного преобразования от приемно-передаточной функции в процессе работы метода фазовых шагов с увеличением частоты фазовой модуляции интенсивности из-за пространственных амплитудно-частотных ограничений формирующей и регистрирующей оптики. На практике для компенсации нелинейности приемно-передаточной функции выполняют ее аппроксимацию степенными [50-54] и параметрическими [55, 56] строго монотонными зависимостями. Ограничением данных подходов является отсутствие адаптивности к искажению характера нелинейности и монотонности приемно-передаточной функции в результате изменения светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности и нарушения согласованности ограниченных динамических диапазонов источника и приемника оптического излучения. Проблема адаптации к светорассеивающим свойствам поверхности также связана с оптимизацией параметров формирования и регистрации структурированных изображений в методе фазовой триангуляции.

Существующие подходы [57-68] зачастую не учитывают амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) приёмно-передаточного тракта, что может привести к уменьшению количества уровней логического кодирования модулируемого сигнала и ухудшению соотношения сигнал/шум. Отсутствие возможности адаптации к светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности и нелинейности приемно-передаточной функции может привести к существенному росту погрешности расшифровки фазового распределения и контроля трехмерной геометрии объекта в процессе деформации.

Разработка адаптивных методов формирования, регистрации и обработки структурированных изображений в методе фазовой триангуляции для прецизионного контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в машиностроении и энергетике в условиях динамического изменения светорассеивающих свойств поверхности и нелинейной приемно-передаточной функции входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

В научных исследованиях процессов теплообмена и обледенения объектов энергетики требуется контроль геометрии не только непрозрачных, но и светопреломляющих поверхностей. Проблема их оптической триангуляции связана с рассеянием формируемого светового потока всей толщиной поверхности исследуемого объекта, а также передней и задними гранями и регистрацией фотоприемником интегральной интенсивности, что существенно искажает характер модулируемого сигнала и усложняет его расшифровку. Существенными ограничениями известных методов триангуляционного контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей являются тепловое и механическое воздействие на исследуемый объект [69-75], узкая область применения [71, 76] и сложность использования в условиях нелинейных оптических искажений [77, 78].

Разработка адаптивного метода оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей в машиностроении и энергетике входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Для применения триангуляционной системы на основе структурированного освещения на действующих силовых, аэродинамических и климатических экспериментальных стендах требуется обеспечение возможности контроля деформаций диагностируемой поверхности на основе результатов измерения ее трехмерной геометрии. Традиционно решение данной задачи основано на детектировании смещений участков поверхности на изображениях до и после деформации и их преобразовании в трехмерные векторы [79-81] с использованием калибровочных данных. К текстуре измеряемой поверхности объекта предъявляют требование наличия характерных, отличительных особенностей. В случае их отсутствия на поверхность наносят специальные шаблоны или покрытия [5-9]. Подготовка контролируемой поверхности, выбор метода диагностики и установка параметров измерительной системы происходят перед началом испытаний. В результате отсутствие адаптации к динамично изменяющимся светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности приводит к росту погрешности или исключению возможности контроля ее трехмерных деформаций.

Разработка адаптивного к текстуре поверхности комплекса методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций объектов в машиностроении и энергетике входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Перед применением триангуляционной системы на основе структурированного освещения в задаче дистанционного контроля трехмерной геометрии объекта, изолированного в рабочем участке экспериментального стенда с оптическим доступом, требуется ее настройка в соответствии с целью исследования. Ее важной частью является настройка измерительного объема. На сегодняшний день в науке и промышленности

успешно применяют системы триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов с различными размерами измерительного объема: от элементов печатных плат [82, 83] до компонент двигателя [84, 85]. Калибровка каждой системы реализуется под конкретный размер измерительного объема, непосредственно влияющий на пространственное разрешение и размер диагностируемой области. Для увеличения пространственного разрешения зачастую необходимо выполнить перекалибровку системы под меньший измерительный объем, что приводит к уменьшению диапазона контролируемых размеров и потере информации о трехмерной геометрии на отдельных участках поверхности. Для проведения высокоинформативных научных исследований и опытно-конструкторских испытаний в машиностроении и энергетике требуется применение триангуляционной системы, состоящей из нескольких модулей с различными размерами измерительного объема для одновременного контроля геометрии как всей регистрируемой поверхности, так и отдельных участков с повышенным пространственным разрешением. Проблема применения данной системы на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом связана с необходимостью ее калибровки, включающей компенсацию нелинейных оптических искажений и согласование результатов трехмерных измерений отдельных моделей. Несмотря на наличие множества известных методов калибровки [86-93], их затруднительно адаптировать для многомодульной системы триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов в условиях нелинейных оптических искажений.

Создание методов калибровки триангуляционных систем для обеспечения возможности контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике с адаптивным локальным пространственным разрешением в условиях нелинейных оптических искажений входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Важной частью диссертационной работы является практическая реализация адаптивных триангуляционных систем для прецизионного

контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике. Результатом их испытаний должны являться оценка метрологических характеристик, верификация работоспособности предложенных методов адаптивной оптической триангуляции и подтверждение успешного функционирования спроектированного программного обеспечения.

Практическая реализация и испытания адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике входит в круг задач, решаемых в диссертационной работе.

Цель диссертационной работы: разработка и практическая реализация методов оптической триангуляции, адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям, для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

Задачи диссертационной работы:

1) разработка адаптивных методов формирования, регистрации и обработки структурированных изображений для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике в условиях динамического изменения светорассеивающих свойств поверхности и нелинейной приемно-передаточной функции;

2) создание методов калибровки триангуляционных систем для обеспечения возможности контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике с адаптивным локальным пространственным разрешением в условиях нелинейных оптических искажений;

3) практическая реализация и испытания адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

Научная новизна диссертации:

1) предложен и внедрен новый метод фазовой триангуляции непрозрачных поверхностей в условиях динамического изменения их светорассеивающих свойств на основе адаптивной компенсации нелинейности приемно-передаточной функции и оптимизации параметров пространственно-временной модуляции интенсивности;

2) разработан и апробирован новый метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения и адаптивной декомпозиции регистрируемого сигнала от аддитивного светового потока;

3) обеспечен динамический контроль трехмерного профиля наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением в исследованиях процессов обледенения объектов энергетики в условиях изменения светорассеивающих свойств поверхности и нелинейных оптических искажений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) использование устойчивого к изменению светорассеивающих свойств поверхности метода фазовой триангуляции с адаптивной компенсацией нелинейности приемно-передаточной функции в условиях ограниченного динамического диапазона оптической системы обеспечивает контроль трехмерной геометрии непрозрачных объектов с погрешностью на уровне 0.02 % от глубины измерительного объема;

2) применение адаптивного метода оптической триангуляции на основе пространственно-временной модуляции интенсивности в виде динамического светового сечения обеспечивает контроль трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей с погрешностью на уровне 0.07 % от глубины измерительного объема;

3) автоматизированная калибровка триангуляционных систем с регрессионным и дифференциальным анализом фазовых распределений обеспечивает компенсацию нелинейных оптических искажений и

возможность контроля трехмерной геометрии объектов с адаптивным пространственным разрешением;

4) адаптивная обработка данных оптической триангуляции на основе пространственно-временного корреляционного анализа и многопараметрического восстановления полигональной поверхности обеспечивает возможность контроля трехмерных деформаций объектов в машиностроении и энергетике с светорассеивающими свойствами в широком диапазоне.

В работе использованы методы: оптической триангуляции, цифровой обработки сигналов и изображений, пространственно-временного корреляционного анализа, численной оптимизации, математической статистики, аналитической геометрии и объектно-ориентированной декомпозиции программного обеспечения.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена аналитическими исследованиями, созданием действующих прототипов адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии и деформаций исследуемых объектов в процессах статического нагружения, сублимации и обледенения, результатами их лабораторных и производственных испытаний.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем самостоятельно. Постановка задач исследования и анализ научной проблематики выполнялись диссертантом как единолично, так и при участии научного руководителя д.т.н. С.В. Двойнишникова. Разработка программных интерфейсов, методов измерения и калибровки адаптивных триангуляционных систем, их внедрение, испытания и обработка измерительных данных выполнялись автором самостоятельно. Проектирование функциональных узлов и практическая реализация

адаптивных триангуляционных систем выполнялись сотрудниками научного коллектива при непосредственном участии соискателя.

Практическая ценность и реализация результатов работы

На основе полученных результатов и выводов разработаны действующие прототипы адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем с возможностью прецизионного контроля трехмерной геометрии и деформаций исследуемых объектов в процессах статического нагружения, сублимации и обледенения в задачах машиностроения и энергетики. С использованием разработанной адаптивной многомодульной триангуляционной системы в машиностроении обеспечена возможность дистанционной и одновременной микро- и макромасштабной диагностики поля деформаций объектов с комплексным напряженно-деформированным состоянием при их статическом нагружении. Благодаря применению разработанных адаптивных триангуляционных систем на действующих аэродинамических и климатическом стендах закрытого типа в институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН обеспечены возможности бесконтактной диагностики параметров массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок, и динамического контроля трехмерного профиля наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением в рамках поиска эффективных методов борьбы с обледенением объектов энергетики. Результаты работы активно используются в АО «УМЗ», АО «Вектор-Бест», ООО «Сигма-Про», ООО «ЛИСТ», ОАО «ИОИТ», ООО «БИТ» и ряда институтов СО РАН, а сфера их применения может быть расширена на другие области науки и промышленных технологий в машиностроении и энергетике.

Апробация работы. Результаты работы представлялись и обсуждались на Национальной конференции с международным участием «СибОптика. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей» (Новосибирск, 2022,

2023, 2024, 2025), Международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2021, 2022, 2023), Международной конференции по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2022, 2024), Международной научно-практической конференции «Золотухинские чтения. Нефть, газ и энергетика в Арктическом регионе» (Архангельск, 2023), Всероссийской конференции с международным участием «XL Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2024, 2025), Всероссийской школе-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Шерегеш, 2023), Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Севастополь, Сочи, Махачкала, Сочи 2021, 2022, 2023, 2025), Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Онлайн, Новосибирск, Московская область, 2022, 2024, 2025), Международной конференции по химическим реакторам «ХимРеактор» (Минск, 2025).

Публикации. По материалам работы соискателем лично и в соавторстве опубликовано 65 печатных работ, из них 15 научных статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 18 научных статей и 23 тезиса докладов в материалах научных конференций, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 5 патентов Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 141 страницу и 84 рисунка. Список источников литературы содержит 105 работ отечественных и зарубежных авторов.

Первая глава посвящена анализу существующих адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям оптико-электронных методов контроля геометрии объектов.

Вторая глава посвящена разработке адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям методов оптической триангуляции объектов в машиностроении и энергетике.

В третьей главе обсуждаются вопросы практической реализации и проектирования внутренней архитектуры программного обеспечения адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям систем триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

В четвертой главе представлены результаты лабораторных и производственных испытаний разработанных адаптивных триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Глава 1. Анализ адаптивных оптико-электронных методов контроля геометрии объектов

1.1. Адаптивные к нелинейным искажениям оптико-электронные методы контроля геометрии объектов

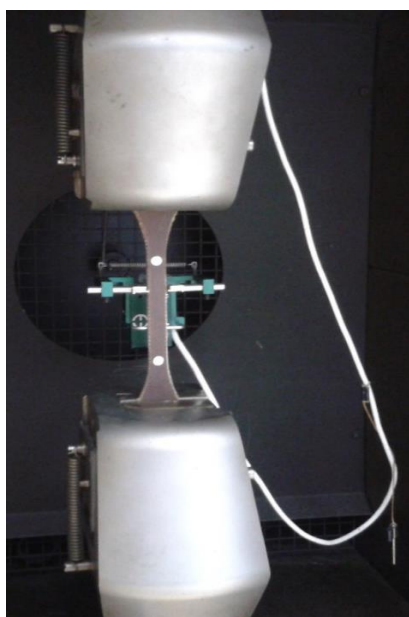
В широком спектре научных и опытно-конструкторских задач в машиностроении и энергетике на силовых, аэродинамических и климатических экспериментальных стендах требуется дистанционный контроль изменения трехмерной геометрии исследуемого объекта, изолированного в рабочем участке с оптическим доступом. Конструкционные ограничения экспериментальных стендов и требование отсутствия контакта с объектом в случае диагностики нароста и эрозии обосновывают ограниченность применения в данных задачах контактных методов и перспективность использования оптико-электронных технологий.

Применение оптико-электронных методов для диагностики трехмерных деформаций объекта, изолированного в рабочем участке экспериментального стенда с оптическим доступом, требует компенсации геометрических aberrаций оптических элементов и нелинейности траекторий лучей при прохождении через стенки рабочего участка.

Среди адаптивных к нелинейным оптическим искажениям оптико-электронных методов контроля трехмерных деформаций без непосредственного измерения геометрических параметров поверхности, существенное развитие и применение получили подходы на основе структурированного освещения [1-4] и оптической экстензометрии [5-9]. Принцип работы методов оптической экстензометрии основан на корреляционном анализе изображений поверхности до и после деформации и детектировании смещений ее участков (рис. 1.1). Принцип работы фазового метода с использованием структурированного освещения основан на формировании на диагностируемой поверхности фазового распределения, его регистрации фотоприемником и контроля изменения относительно исходного

состояния объекта. Расчет деформации основан на предположении пропорциональности разности фазовых распределений полю смещений.

Существенным ограничением области применения данных методов является отсутствие возможности контроля пространственных деформаций в произвольных направлениях.



а)



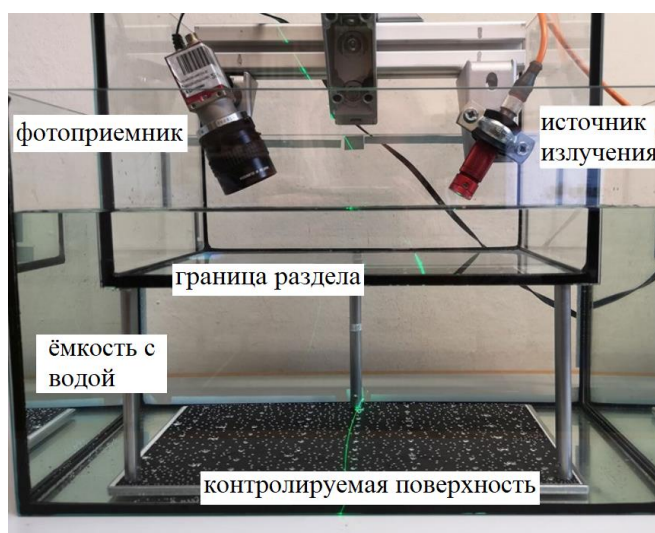
б)

Рис. 1.1. Экстензометрический контроль растяжения (а) и сжатия (б) образцов, установленных в захватах испытательных систем.

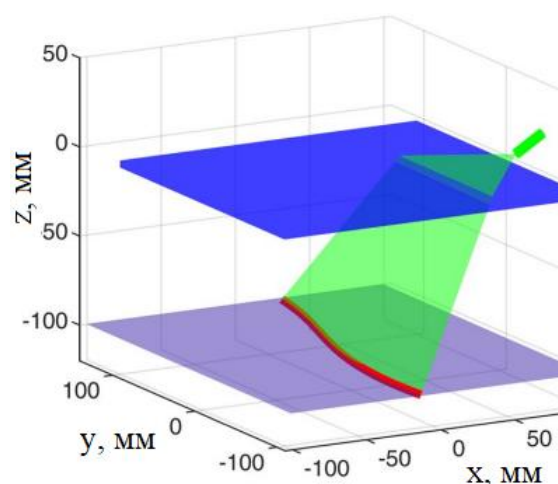
Среди оптико-электронных методов контроля пространственных деформаций существенное развитие получили подходы на основе восстановления трехмерного профиля поверхности и последующего анализа его изменения. Известны адаптивные к нелинейным оптическим искажениям пассивные и активные методы измерения трехмерной геометрии объектов: лазерной дальнометрии [10-15], фотограмметрии [16-20], лазерной триангуляции [21-27] и оптической триангуляции с использованием структурированного освещения [28-38].

Адаптация к нелинейным оптическим искажениям методов лазерной дальнометрии, фотограмметрии и лазерной триангуляции достигается с помощью разработки модели распространения оптических лучей [23, 24].

Для этого необходимы высокоточные измерения внутренних параметров фотоприемника, координат и ориентации оптических элементов в пространстве, геометрии экспериментального стенда, коэффициентов преломления сред и координат линии на изображении фотоприемника в случае использования лазерного излучения (рис. 1.2). В противном случае погрешность диагностики трехмерной геометрии может увеличиться на порядки [22-24]. В результате прецизионный контроль трехмерной геометрии объектов в условиях нелинейных оптических искажений на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом методами лазерной дальнометрии, фотограмметрии и лазерной триангуляции существенно осложнен.



а)



б)

Рис. 1.2. Применение методов лазерной триангуляции для контроля трехмерной геометрии объекта в воде: а) измерительная установка; б) визуализация нарушения прямолинейности формируемого излучения.

Известен адаптивный к нелинейным оптическим искажениям метод триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов с использованием структурированного освещения в виде двумерной сетки (рис. 1.3), получивший практическое применение на действующем аэродинамическом стенде [28, 31]. Принцип его работы заключается в поиске

ключевых точек на изображении фотоприемника и восстановлении их трехмерных координат на основе калибровочных соответствий положениям в пространстве.

Основным недостатком известного метода является ограниченное пространственное разрешение результатов трехмерных измерений. Для его увеличения требуется уменьшения размера элемента формируемой сетки, что осложнено проблемой расшифровки координат ключевых точек в формируемой двумерной структуре.

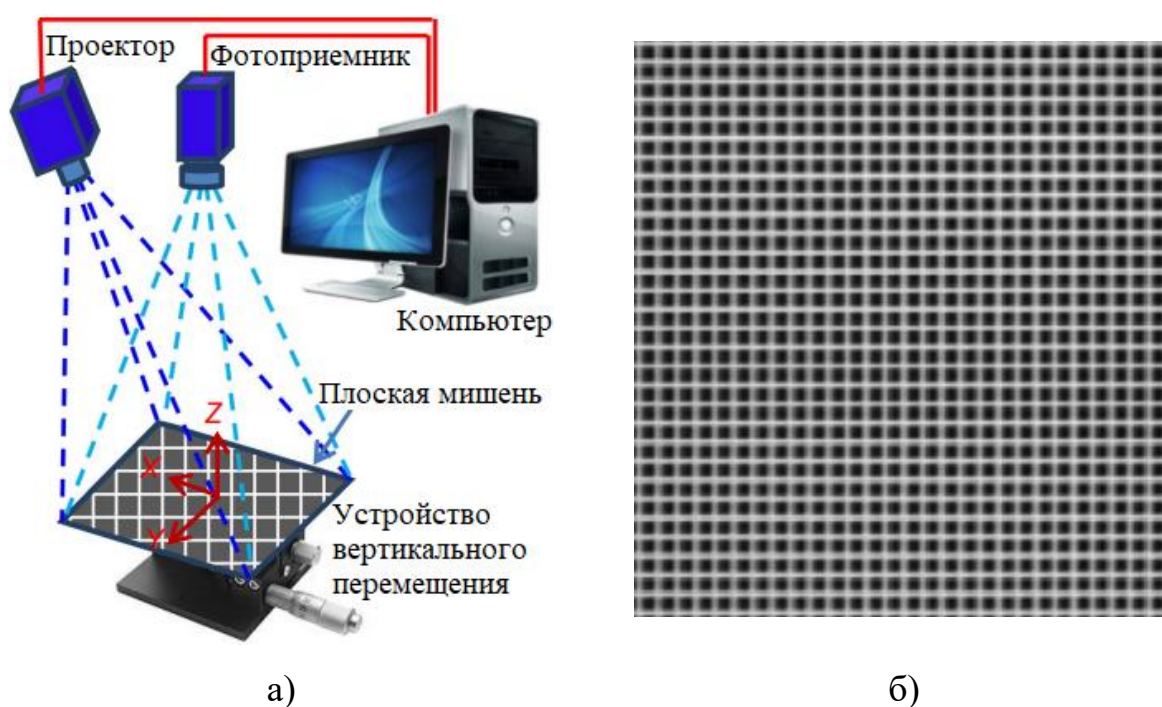


Рис. 1.3. Калибровка (а) системы триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов с использованием структурированного освещения в виде двумерной сетки (б).

Известны методы триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов на основе структурированного освещения с адаптивной компенсацией нелинейных оптических искажений в модели распространения оптических сигналов [29, 32].

Их основными ограничениями являются узкая область применения из-за проектирования для стендов заданной формы и сложность минимизации погрешности трехмерных измерений, обусловленная необходимостью

высокоточного расчета внутренних параметров фотоприемника, координат и ориентации оптических элементов в пространстве и коэффициентов преломления сред.

Известны методы триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов на основе структурированного освещения с адаптивной компенсацией геометрических aberrаций оптических элементов и нелинейности траекторий лучей в калибровочных зависимостях трехмерных координат (X, Y, Z) от координаты P_x матрицы источника излучения [30, 38] (рис. 1.4).

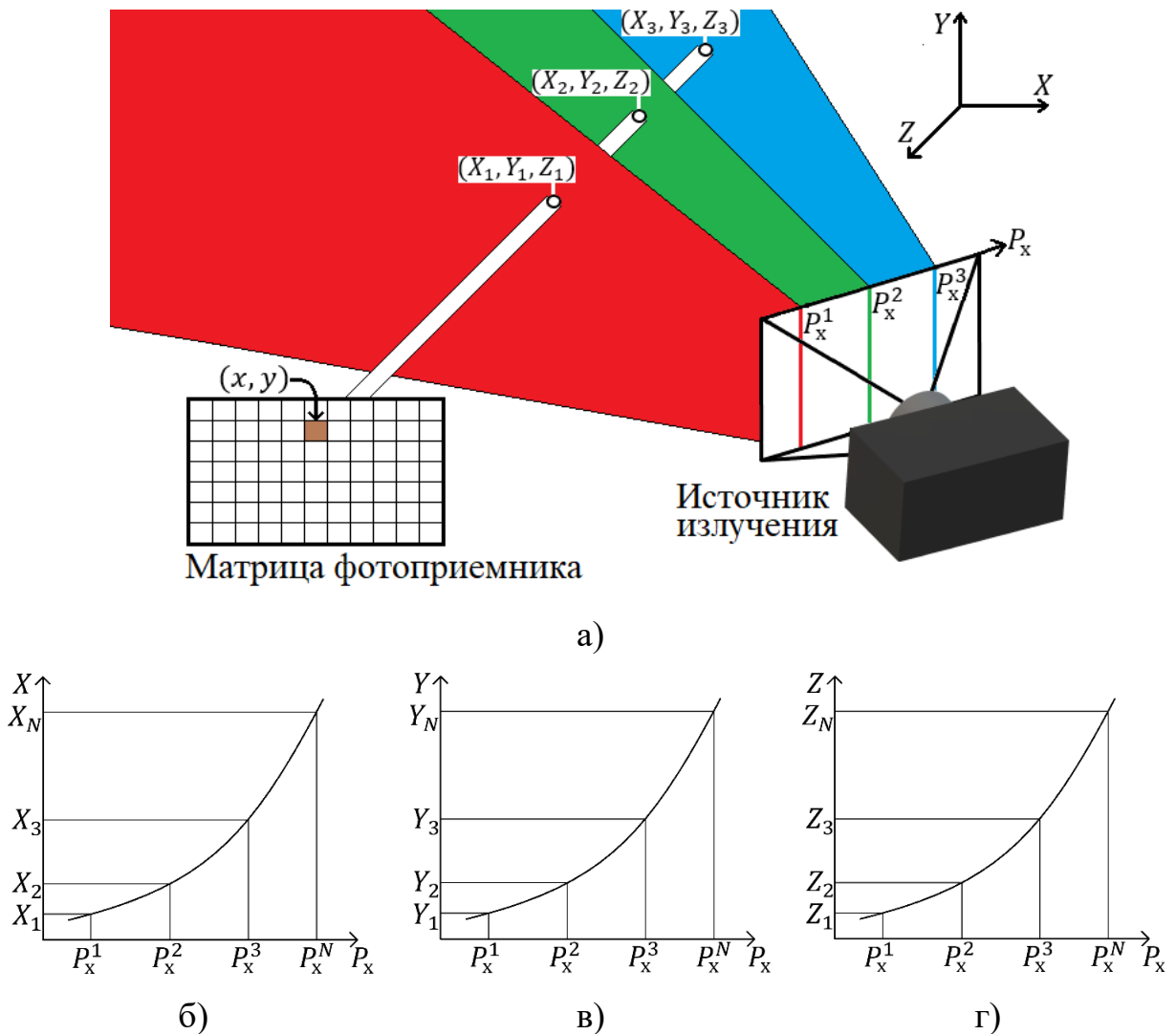


Рис. 1.4. Калибровка триангуляционной системы (а) с восстановлением в пикселах (x, y) матрицы фотоприемника зависимостей пространственных координат (X, Y, Z) от координаты P_x матрицы источника оптического излучения (б, в, г).

Для обеспечения возможности расшифровки координаты P_x матрицы источника излучения в широком диапазоне размеров объекта требуется применение методов фазовой триангуляции, устойчивых к расфокусировке формирующей и регистрирующей оптических подсистем [39-42]. В известной реализации метода фазовой триангуляции формируемые источником оптического излучения структурированные изображения имеют гармоническое распределение яркости вдоль горизонтальной оси:

$$I_{(P_x, P_y)}^{out} = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi f P_x}{S}\right), \quad (1.1)$$

где (P_x, P_y) – координаты на формируемом изображении, a_0 – средняя яркость, a_1 – амплитуда, f – частота фазовой модуляции интенсивности, S – горизонтальное разрешение источника излучения. Известный метод минимизации погрешности расшифровки фазового распределения основан на фазовых шагах [43-46]. Вводятся N линейных сдвигов $\Delta\varphi_i = \frac{2\pi i}{N}$ фазовой функции и источником оптического излучения последовательно формируются структурированные изображения с распределением яркости:

$$I_{(P_x, P_y, i)}^{out} = a_0 + a_1 \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi_i), \quad (1.2)$$

$$\varphi = P_x \frac{2\pi f}{S}. \quad (1.3)$$

Для восстановления φ на основе набора зарегистрированных значений интенсивности $I_{(x, y, i)}^{in}$ зачастую предполагается линейность приемно-передаточной функции и пропорциональность $I^{in} I^{out}$, что сводит задачу к решению системы трансцендентных уравнений [43]:

$$I_{(x,y,i)}^{in} = b_0 + b_1 \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi_i). \quad (1.4)$$

Так как на практике предположение о линейности приемно-передаточной функции измерительного тракта, как правило, не работает, то для уменьшения погрешности расшифровки φ необходима компенсация ее нелинейности.

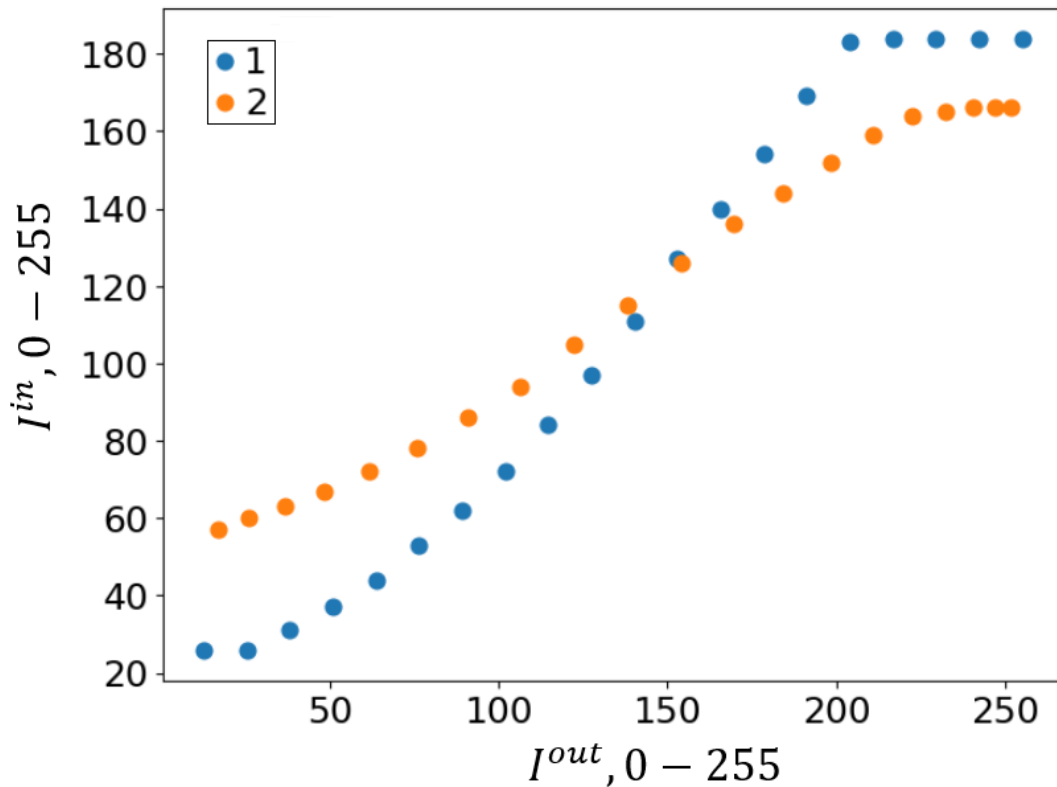


Рис. 1.5. Восстановленные соответствия $I^{in} \leftrightarrow I^{out}$ при линейном увеличении яркости равномерного изображения источника (1) и работе метода фазовой триангуляции с частотой пространственной модуляции интенсивности $f = 50$ (2).

Возможность восстановления характера нелинейности приемно-передаточной функции напрямую с помощью линейного увеличения яркости равномерного изображения источника [47-49] и сохранения ее преобразования в регистрируемые приемником значения интенсивности существенно ограничена. Это связано с ростом отклонения данного преобразования от приемно-передаточной функции в процессе работы метода

фазовых шагов с увеличением частоты фазовой модуляции интенсивности (рис. 1.5) в соответствии с АЧХ оптической системы измерительного комплекса. На практике для компенсации нелинейности приемно-передаточной функции выполняют ее аппроксимацию степенными [50-54] и параметрическими [55, 56] строго монотонными зависимостями. Ограничением данных подходов является отсутствие адаптивности к искажению характера нелинейности и монотонности приемно-передаточной функции в результате изменения светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности и нарушения согласованности ограниченных динамических диапазонов источника и приемника оптического излучения. Отсутствие компенсации нелинейности приемно-передаточной функции может привести к существенному росту погрешности восстановления фазового распределения и контроля трехмерной геометрии диагностируемой поверхности.

Показано, что для дистанционного контроля трехмерной геометрии объектов на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом наиболее перспективно применение триангуляционных методов с использованием структурированного освещения и калибровки, включающей компенсацию геометрических aberrаций оптических элементов и нелинейности траекторий лучей в калибровочных зависимостях трехмерных координат (X, Y, Z) от координаты P_x матрицы источника излучения. Для расширения диапазона контролируемых размеров диагностируемого объекта процессы измерения трехмерной геометрии и калибровки должны быть основаны на фазовой триангуляции. Однако на момент начала работы над диссертацией проблема прецизионных измерений методом фазовой триангуляции с адаптивной компенсацией нелинейности приемно-передаточной функции измерительного тракта в условиях динамического изменения светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности оставалась актуальной.

1.2. Адаптивные к светорассеивающим свойствам поверхности методы триангуляционного контроля геометрии объектов

Для минимизации погрешности измерений методом фазовой триангуляции в процессах калибровки и диагностики трехмерной геометрии объектов требуется автоматизация поиска оптимальных параметров подсистем формирования и регистрации оптического излучения в соответствии с светорассеивающими свойствами диагностируемой поверхности. Данное требование обосновано их динамичным изменением в процессе деформации поверхности и зависимостью погрешности измерений фазовой триангуляцией от частоты пространственной модуляции интенсивности и отношения между энергетической характеристикой модулируемого сигнала и динамическим диапазоном оптической системы [47].

Для обеспечения согласованности энергетической характеристики модулируемого сигнала и динамического диапазона оптической системы в процессе фазовой триангуляции объекта известны методы регистрации [57-59] и формирования [60-62] структурированных изображений с несколькими экспозициями и значениями амплитуды, соответственно, а также способы их адаптивной настройкой в соответствии с светорассеивающими свойствами диагностируемой поверхности с помощью максимизации разницы значений интенсивности, регистрируемых при формировании полностью белого и черного изображений [63-65].

Недостатком первой группы методов является увеличение количества элементов аппаратной части и итераций формирования-регистрации структурированного изображения, что приводит к линейному росту стоимости системы и времени диагностики трехмерной геометрии, соответственно. Недостатком второй группы методов является оптимизация экспозиции фотоприемника и амплитуды источника без учета АЧХ оптической системы измерительного комплекса, что приводит к уменьшению

количества уровней логического кодирования модулируемого сигнала (рис. 1.6), ухудшению соотношения сигнал/шум и увеличению погрешности его расшифровки.

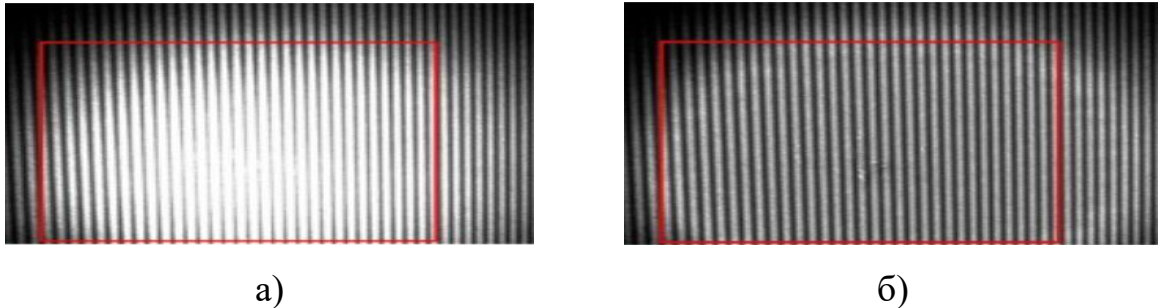


Рис. 1.6. Фазовая триангуляция поверхности с адаптивной настройкой амплитуды модулируемого сигнала (б) и без нее (а).

Для оптимизации частоты пространственной модуляции интенсивности f в методе фазовой триангуляции известны методы на основе оценки функции размытия точки [4]. В данных подходах реализован поиск максимального значения f , при котором может быть расшифровано фазовое распределение φ .

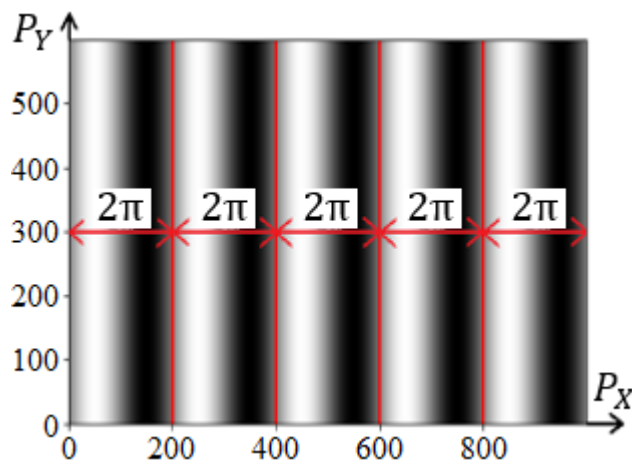


Рис. 1.7. Соотношения между горизонтальным разрешением матрицы источника оптического излучения и размерами областей однозначной расшифровки φ при частоте фазовой модуляции интенсивности $f = 5$.

Недостатком данных подходов является отсутствие учета ограниченной разрешающей способности используемого метода расширения

динамического диапазона фазового волнового фронта, применение которого необходимо для расшифровки номера периода и однозначного восстановления значения φ , измерение которой в методе фазовой триангуляции реализовано по модулю 2π (рис. 1.7). Использование частоты пространственной модуляции интенсивности f , большей чем разрешающая способность метода расширения динамического диапазона фазового волнового фронта, приведет к существенному росту объема недостоверных измерительных данных.

Необходимость адаптации к светорассеивающим свойствам особенно актуальна при триангуляционном контроле трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей. Проблема их оптической триангуляции связана с рассеянием формируемого светового потока всей толщиной поверхности исследуемого объекта, а также передней и задними гранями (рис. 1.8) и регистрацией фотоприемником интегральной интенсивности, что существенно искажает характер модулируемого сигнала (рис. 1.9) и усложняет его расшифровку.

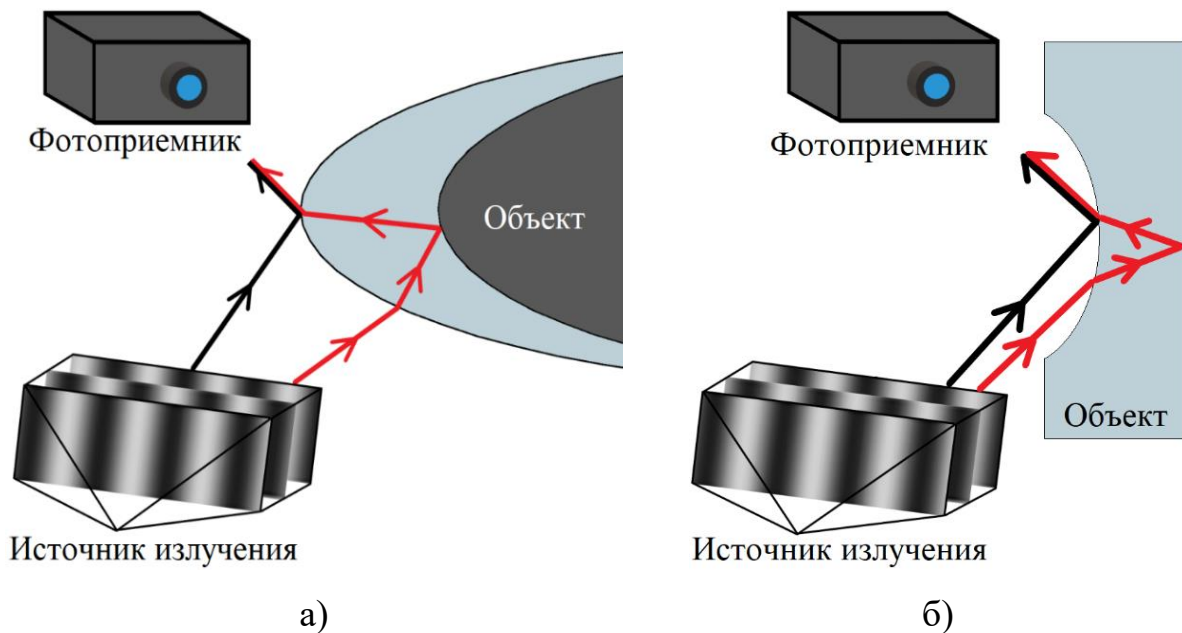


Рис. 1.8. Рассеяние светового потока передней и задней гранями поверхности в процессах формирования нароста (а) и эрозии (б).

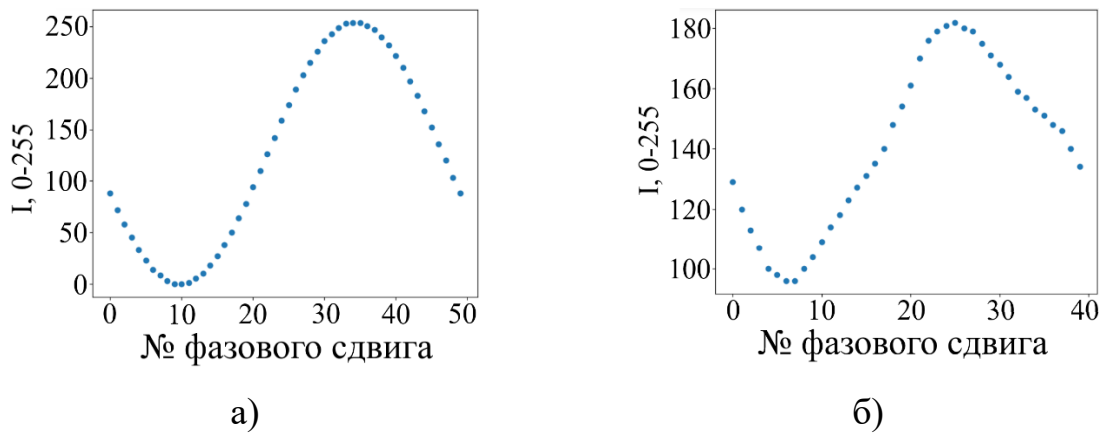


Рис. 1.9. Зарегистрированные значения интенсивности в методе фазовых шагов при рассеянии светового потока одной (а) и двумя (б) гранями поверхности.

Известны методы триангуляционного контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей с компенсацией светового потока от периферийных источников рассеяния [69-73]. Принцип их работы заключается в формировании на контролируемой поверхности зондирующей подсветки, часть энергии которой поглощается объектом. Регистрируя тепловое излучение от контролируемой поверхности приемником в инфракрасном диапазоне, детектируют положение подсветки на изображении объекта (рис. 1.10). Далее на основе степени искажения структуры зондирующей подсветки восстанавливают высоту рельефа поверхности.

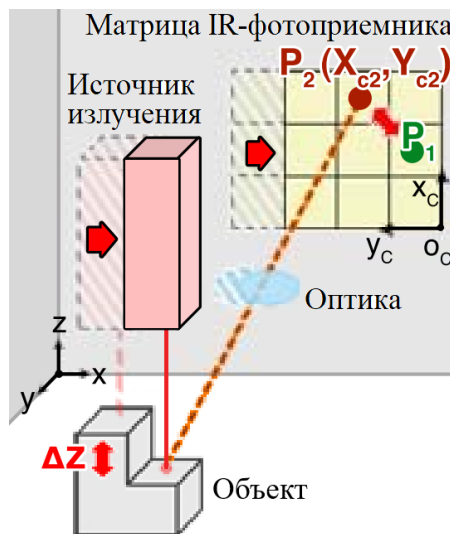
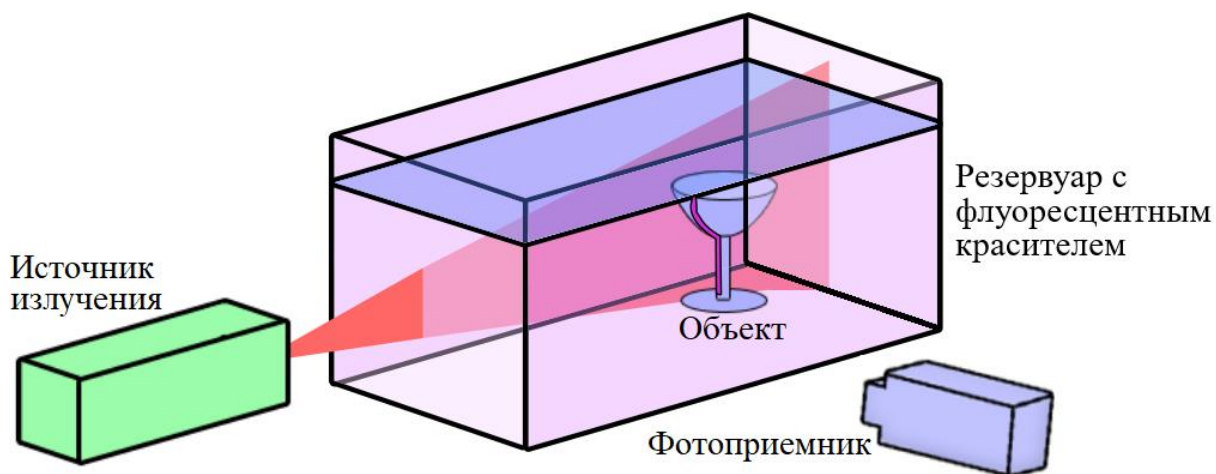


Рис. 1.10. Триангуляционный контроль трехмерной геометрии в инфракрасном диапазоне.

Известен метод контроля трехмерной геометрии поверхностей в широком диапазоне оптических свойств, реализующий принцип сканирующей подсветки в среде с флуоресцентным красителем (рис. 1.11, а) [74, 75]. В результате флуоресценции красителя на регистрируемом изображении детектируют контуры поверхности (рис. 1.11, в), по которым судят о геометрии контролируемого объекта (рис. 1.11, г).



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.11. Оптический контроль (а) трехмерной геометрии (г) объектов (б) в среде с флуоресцентным красителем (в).

Недостатком описанных методов является тепловое и механическое воздействие на диагностируемую поверхность, которое может привести к нарушению ее исходной геометрии.

Известен метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей с одной плоской гранью (рис. 1.12) [71, 76]. Диагностируемый

объект плоской гранью размещают на светорассеивающем экране, источником излучения формируют структурированные изображения и регистрируют их искажения фотоприемником. С учетом законов геометрической оптики и на основе изменения положения зондирующей подсветки восстанавливают высоту рельефа поверхности.

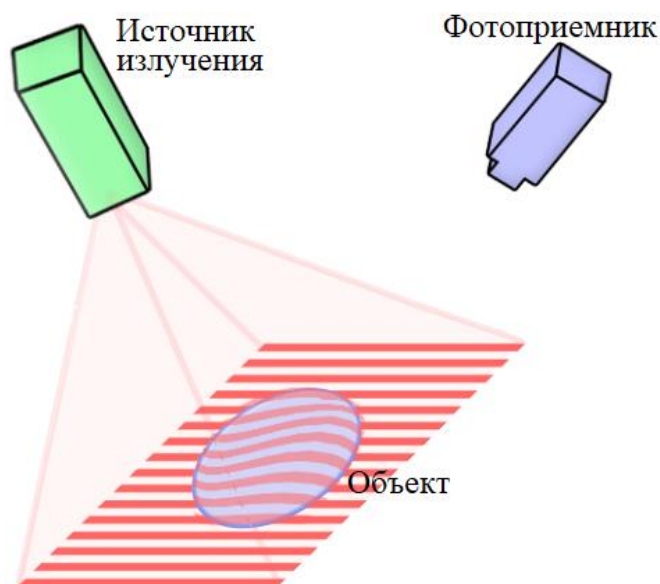


Рис. 1.12. Триангуляционный контроль высоты рельефа светопреломляющей поверхности с одной плоской гранью.

Недостатками известного метода являются необходимость высокоточного измерения коэффициентов преломления сред и ограниченная область применения из-за требования плоскостности одной из граней диагностируемой поверхности.

Известен адаптивный метод контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей, основанный на фотограмметрии и лазерной триангуляции (рис. 1.13) [77, 78]. Источник формирует излучение с плоской разверткой, а фотоприемник регистрирует результат его рассеяния гранями поверхности объекта (рис. 1.13, б). С помощью классификации результатов детектируют участки, соответствующие передней грани, и сохраняют их трехмерные координаты.

Основным ограничением известного метода является сложность его применения в условиях нелинейных оптических искажений на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом. Это обосновано необходимостью разработки модели распространения оптических сигналов [23], высокоточного измерения внутренних параметров фотоприемника, координат и ориентации оптических элементов в пространстве, геометрии экспериментального стенда, коэффициентов преломления сред [24] и координат лазерной линии на зарегистрированном изображении (рис. 1.13, б). В противном случае погрешность восстановления трехмерных координат участков поверхности может увеличиться на порядки [22-24].

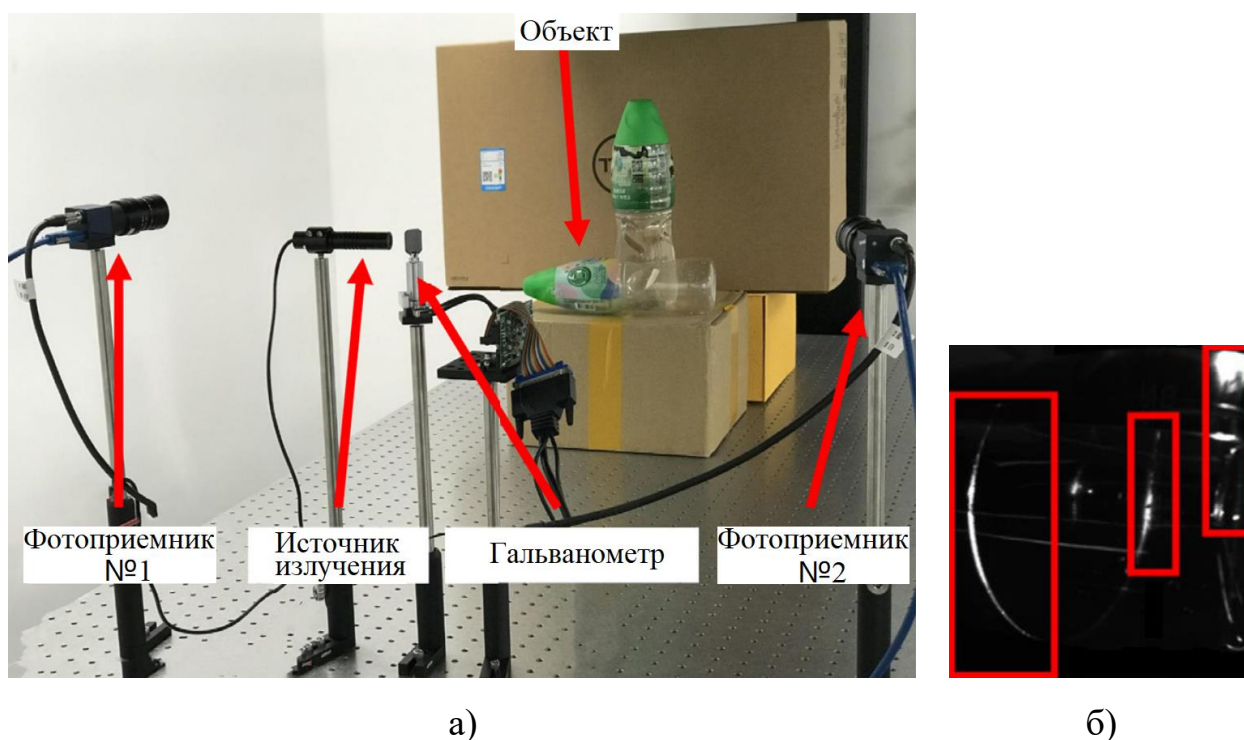


Рис. 1.13. Дистанционный контроль трехмерной геометрии светопреломляющей поверхности (а) на основе методов фотограмметрии и лазерной триангуляции с классификацией результатов измерений (б).

Показано, что на момент начала работы над диссертацией оставалась актуальной проблема оптической триангуляции непрозрачных и

светопреломляющих поверхностей с адаптацией к их светорассеивающим свойствам.

1.3. Выводы по главе 1

1) Показана перспективность применения триангуляционных методов с использованием структурированного освещения и калибровки, включающей компенсацию геометрических аберраций оптических элементов и нелинейности траекторий лучей в калибровочных зависимостях трехмерных координат (X, Y, Z) от координаты P_x матрицы источника излучения, для дистанционного контроля трехмерной геометрии объектов на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом.

2) Обоснована актуальность развития методов фазовой триангуляции с адаптацией к светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности и нелинейности приемно-передаточной функции для прецизионного контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в машиностроении и энергетике.

3) Установлена необходимость разработки адаптивного метода оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей.

Глава 2. Разработка адаптивных методов оптической триангуляции объектов в машиностроении и энергетике

2.1. Метод фазовой триангуляции с адаптацией к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейности приемно-передаточной функции

Для минимизации погрешности контроля трехмерной геометрии объектов в процессе деформации системой на основе фазовой триангуляции требуется применение методов ее адаптации к динамично изменяющимся светорассеивающим свойствам поверхности и характеру нелинейности приемно-передаточной функции.

Общим ограничением известных методов контроля трехмерной геометрии объектов на основе фазовой триангуляции [39-65] является отсутствие адаптивности к искажению характера нелинейности и монотонности приемно-передаточной функции в результате изменения светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности и нарушения согласованности ограниченных динамических диапазонов источника и приемника оптического излучения. Отклонение приемно-передаточной функции от действительной может привести к кратному росту погрешности восстановления фазового распределения и контроля трехмерной геометрии диагностируемого объекта.

Для решения данной проблемы разработан адаптивный к нелинейности приемно-передаточной функции метод фазовой триангуляции. Высокий уровень достоверности результатов его работы не зависит от характера амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта и нелинейности приемно-передаточной функции.

В основе предложенного метода лежит алгоритм минимизации площади замкнутой фигуры, образованной значениями зарегистрированной интенсивности от формируемой источником яркости для заданного фазового сдвига. Алгоритм работает следующим образом. Для каждого элемента

матрицы фотоприемника загружается набор зарегистрированных в процессе работы метода фазовых шагов значений интенсивности I_i^{in} , выбирается значение начальной фазы φ , на его основе и с помощью выражения (1.2) восстанавливается набор сформированных источником излучения значений интенсивности I_i^{out} . Соседние точки из наборов I^{out} и I^{in} соединяются в замкнутый контур: $(I_i^{out}, I_i^{in}) \rightarrow (I_{i+1}^{out}, I_{i+1}^{in})$. На рисунке 2.1 (а) показаны примеры контура $(I_i^{out}, I_i^{in}) \rightarrow (I_{i+1}^{out}, I_{i+1}^{in})$ для случаев линейной приемно-передаточной функции, и нелинейной и несогласованной по динамическому диапазону. В случае ошибки выбора начальной фазы φ площадь Sq данного контура будет увеличена для любого характера приемно-передаточной функции измерительного тракта (рис. 2.1, б, в):

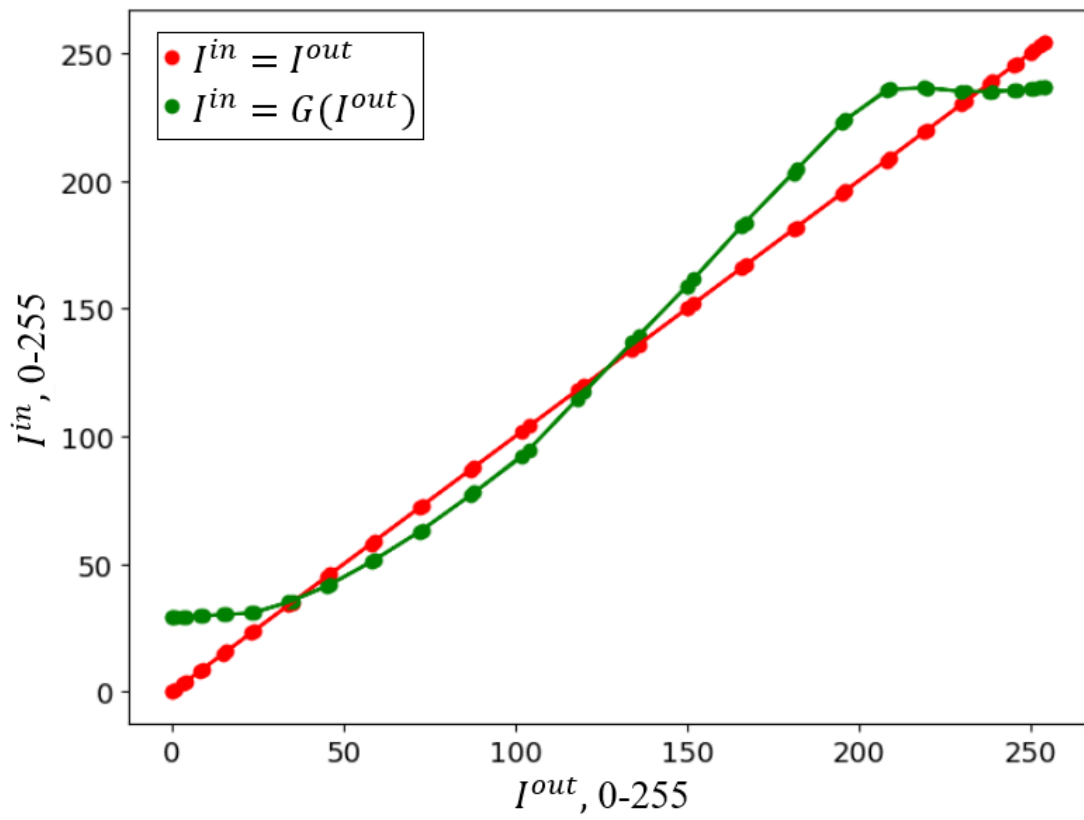
$$Sq(\varphi) = k_1 \left| \sum_{i=0}^{N-1} (I_i^{in} + I_{i+1}^{in}) \cdot \left(\sin \left(\varphi + \frac{2\pi(i+1)}{N} \right) - \sin \left(\varphi + \frac{2\pi i}{N} \right) \right) \right|, \quad (2.1)$$

$$Sq(\varphi) = k_2 \left| \sum_{i=0}^{N-1} I_i^{in} \cdot \cos \left(\varphi + \frac{2\pi i}{N} \right) \right|, \quad (2.2)$$

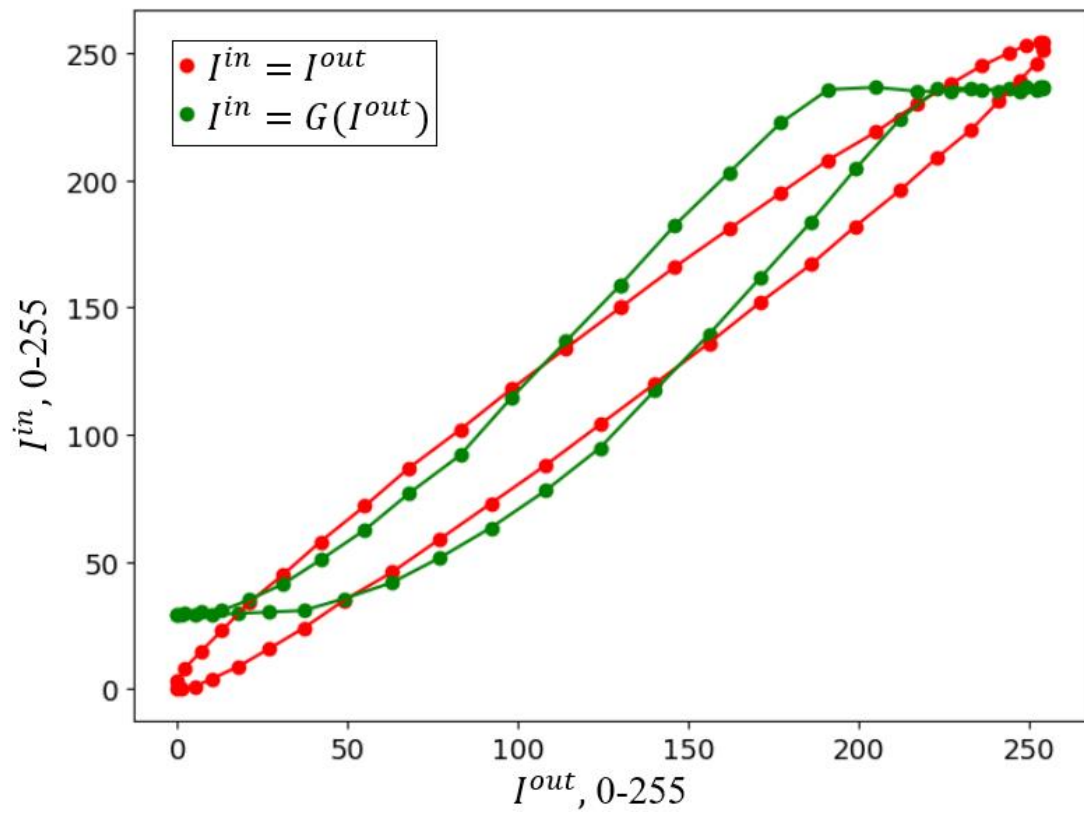
где $k_{1,2}$ – коэффициенты пропорциональности, N – количество фазовых шагов.

В соответствии с выражением (2.2) в качестве метрики оптимальности поиска начальной фазы φ принята M :

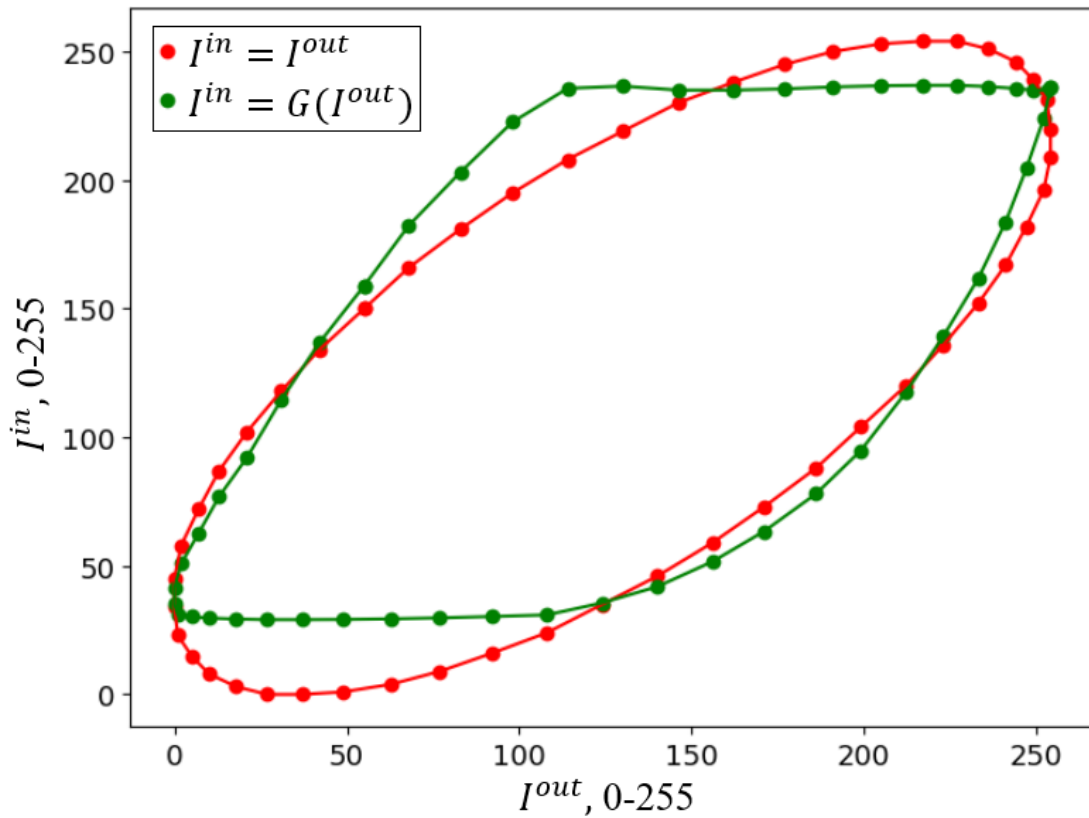
$$M(\varphi) = \left| \sum_{i=0}^{N-1} I_i^{in} \cdot \cos \left(\varphi + \frac{2\pi i}{N} \right) \right|. \quad (2.3)$$



a)



b)



в)

Рис. 2.1. Характерный вид контура $(I_i^{out}, I_i^{in}) \rightarrow (I_{i+1}^{out}, I_{i+1}^{in})$ в методе фазовых шагов при ошибках восстановления фазы 0 (а), $\frac{\pi}{20}$ (б) и $\frac{\pi}{4}$ (в) и приемно-передаточных функциях: линейной и G – нелинейной и несогласованной по энергетическому диапазону.

Для поиска начальной фазы требуется детектирование значения φ из диапазона $[0, 2\pi)$ с минимальным значением метрики M (рис. 2.2), удовлетворяющего условию:

$$\sin\left(\varphi + \frac{2\pi \operatorname{argmax}_{0 \leq i < N} I_i^{in}}{N}\right) > \sin\left(\varphi + \frac{2\pi \operatorname{argmin}_{0 \leq i < N} I_i^{in}}{N}\right). \quad (2.4)$$

Поиск начальной фазы φ реализован путем итерационного интервального бинарного поиска участка с наименьшим значением метрики $M(\varphi)$ (рис. 2.3).

Количество итераций сужения интервала поиска может быть оценено $\log_H \frac{2\pi}{\Delta\varphi}$, где H – количество разбиений интервала поиска, $\Delta\varphi$ – разрешение фазы.

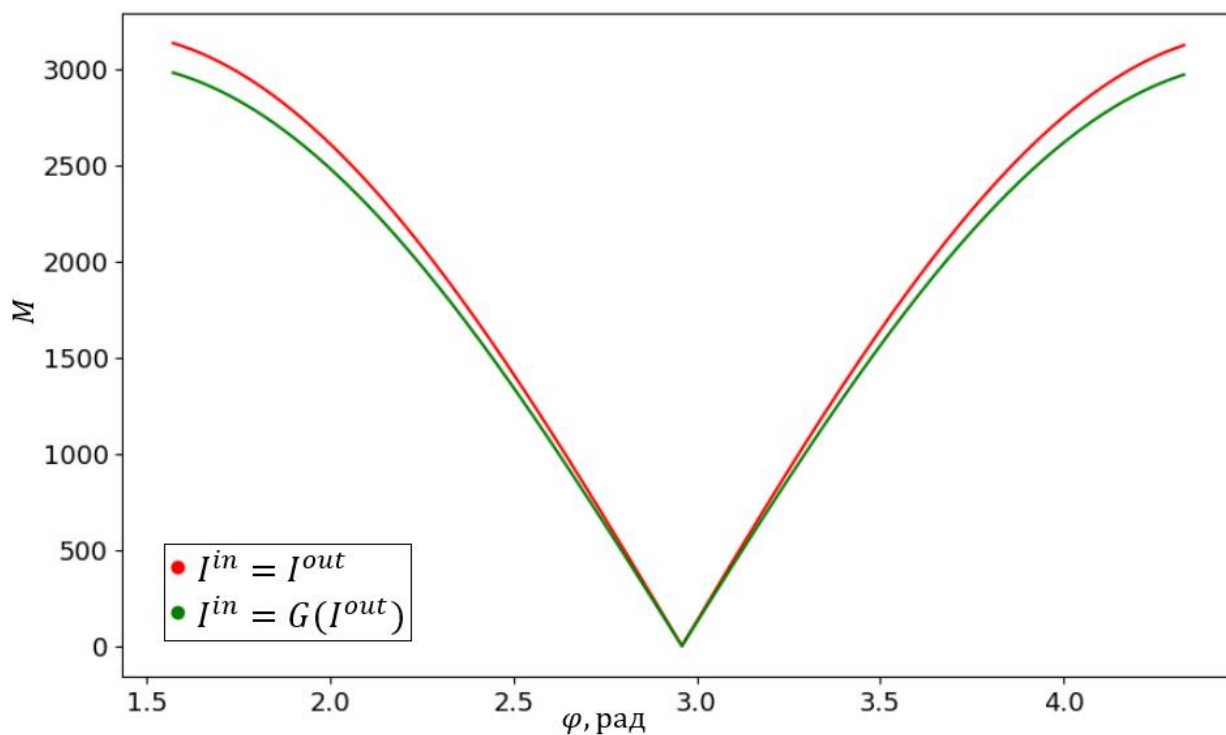


Рис. 2.2. Характерный вид распределения $M(\varphi)$ при приемно-передаточных функциях: линейной и G – нелинейной и несогласованной по энергетическому диапазону.

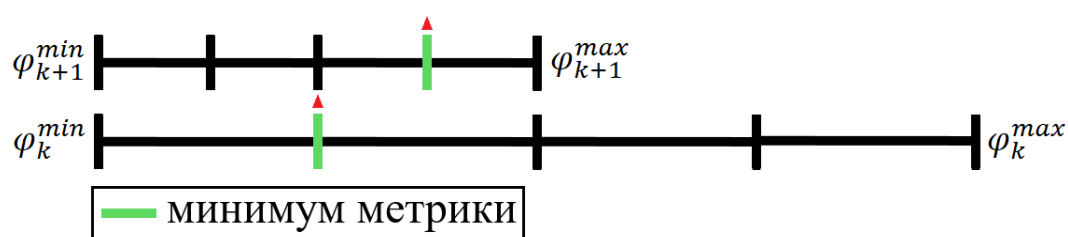


Рис. 2.3. Демонстрация работы метода итерационного интервального бинарного поиска φ .

Для повышения устойчивости разработанного метода восстановления фазового распределения к случайным аддитивным оптическим помехам в формировании и расшифровку структурированных изображений предложено включение элементов статистического анализа. С помощью формирования структурированного изображения для каждого фазового сдвига $\Delta\varphi_i$ k раз и усреднения зарегистрированных значений интенсивности уровень аддитивных помех на анализируемых в конечном итоге данных может быть снижен в \sqrt{k} раз.

Так как в предложенном методе фазовой триангуляции расшифровка фазового распределения реализована в диапазоне $[0, 2\pi)$, то при частоте фазовой модуляции интенсивности $f > 1$ возникает проблема неоднозначности восстановления горизонтальной координаты матрицы источника оптического излучения P_x на основе φ (рис. 1.7).

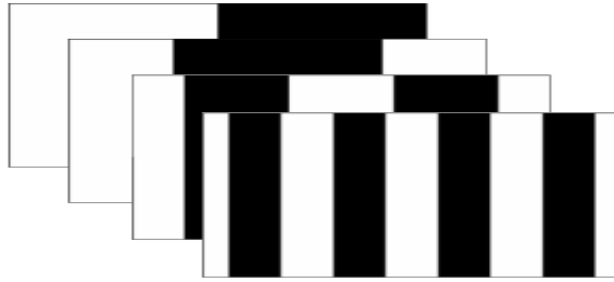


Рис. 2.4. Временное мультиплексирование по двоично-кодированным изображениям на основе бинарных кодов Грея.

Для решения данной проблемы разработан метод расширения динамического диапазона фазового волнового фронта на основе M двоично-кодированных структурированных изображений, реализующих бинарные коды Грея [67] (рис. 2.4):

$$PG_{(x,y)} = \frac{2^{M-1}}{f} \left(\varphi_{period} + \frac{\varphi_{(x,y)}}{2\pi} \right), \quad (2.5)$$

$$\varphi_{period} = Round\left(\frac{G_{(x,y)}f}{2^{M-1}} - \frac{\varphi_{(x,y)}}{2\pi}\right), \quad (2.6)$$

где (x, y) – координаты на изображении фотоприемника, M – количество шаблонов, реализующих бинарное Грей-кодирование, f – частота фазовой модуляции интенсивности, φ – восстановленное значение фазы по модулю 2π , $Round$ – операция округления к ближайшему целому числу, G – Грей-код, PG – результат расширения динамического диапазона фазового волнового фронта до интервала $[0; 2^{M-1})$.

Восстановленное значение фазы с расширенным динамическим диапазоном PG линейно связано с координатой P_X матрицы источника оптического излучения:

$$PG = P_X \frac{2^{M-1}}{S}, \quad (2.7)$$

где S – горизонтальное разрешение источника излучения, 2^{M-1} – размерность кодирования фазы при расширенном динамическом диапазоне.

Для расшифровки кода Грея без использования серии инвертированных изображений [68] разработан метод на основе восстановления порогового значения регистрируемой интенсивности I_{thresh} и его использования для расчета уровня логического кодирования G_m :

$$G_m = \begin{cases} 0, & \text{если } I_m^{in} \leq I_{thresh} \\ 1, & \text{если } I_m^{in} > I_{thresh} \end{cases}. \quad (2.8)$$

Расчет I_{thresh} реализован с адаптацией к светорассеивающим свойствам поверхности и АЧХ оптической системы измерительного комплекса. При увеличении пространственной частоты модуляции интенсивности амплитуда регистрируемого сигнала будет уменьшаться в соответствии с АЧХ оптической системы. Таким образом, если частота модуляции сигнала будет приближена к частоте Котельникова или превышать ее, разница между интенсивностью темных и светлых полос на выходе будет близка к нулю, а значение регистрируемой интенсивности может служить в качестве порога. В итоге оценка порогового значения интенсивности I_{thresh} происходит с помощью проецирования и регистрации 2 структурированных изображений, реализующих бинарные коды Грея, с максимальной пространственной частотой при прямом и инвертированном кодировании (рис. 2.5):

$$I_{thresh}(x, y) = \frac{I_{fmax}(x, y) + I_{fmax}^{инв}(x, y)}{2}, \quad (2.9)$$

где (x, y) – координаты на изображении фотоприемника, I_{fmax} и $I_{fmax}^{инв}$ – зарегистрированные значения интенсивности при проецировании структурированных изображений с максимальной пространственной частотой f_{max} при прямом и инвертированном кодировании, соответственно.

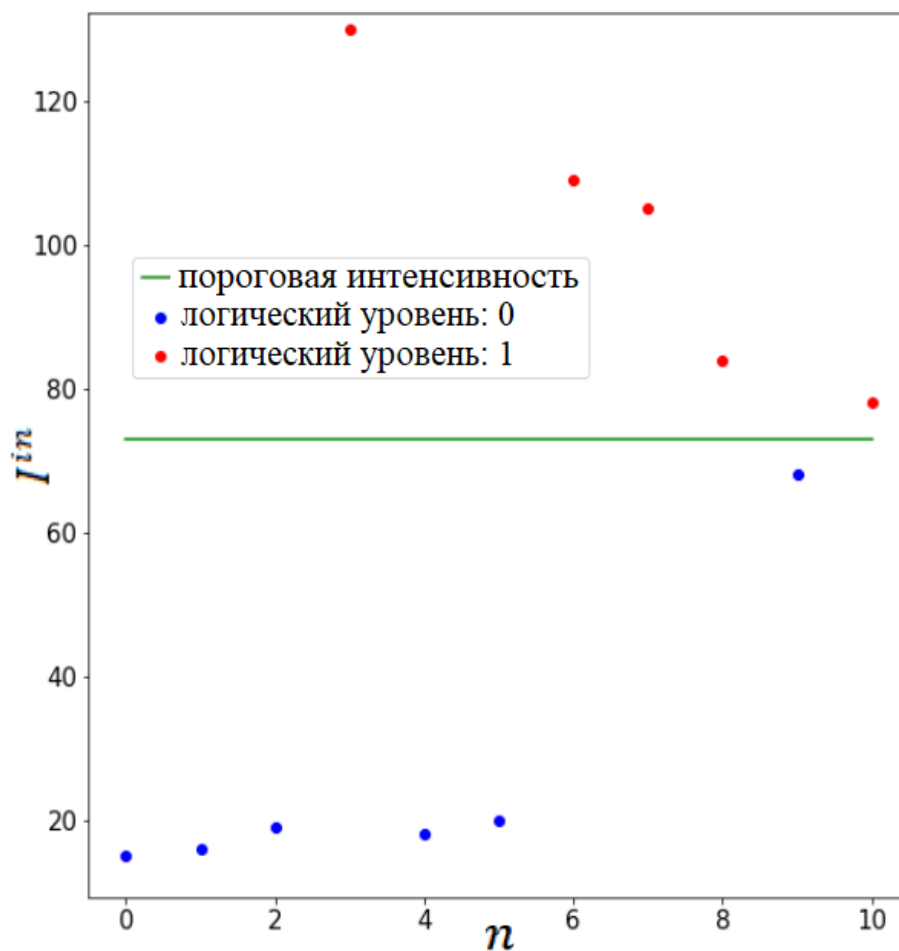


Рис. 2.5. Результаты восстановления логического уровня кодирования на основе зарегистрированных значений интенсивности при формировании 10 двоично-кодированных шаблонов с увеличением пространственной частоты и 11-го шаблона, являющегося инвертированной копией 10-го.

Для минимизации погрешности измерений предложенным методом фазовой триангуляции в условиях динамического изменения

светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности требовалась автоматизация поиска оптимальных значений частоты фазовой модуляции интенсивности, амплитуды формируемого излучения и экспозиции фотоприемника. Критерий оптимальности данных параметров соответствует минимизации погрешности восстановления фазы с расширенным динамическим диапазоном PG , а также ее среднеквадратичного отклонения σ_{PG} :

$$\sigma_{PG} = \sigma_{\varphi} \frac{2^{M-1}}{2\pi f}, \quad (2.10)$$

где σ_{φ} – среднеквадратичное отклонение фазы φ , 2^{M-1} – размерность кодирования фазы при расширенном динамическом диапазоне, f – частота фазовой модуляции интенсивности. Так как восстановление фазы φ реализуется с помощью поиска минимального, околонулевого значения $M(\varphi)$, то неоднозначность $d\varphi$ расшифровки φ может быть выражена на основе:

$$\sum_{i=0}^{N-1} I_i \cdot \cos\left(\varphi + \frac{2\pi i}{N}\right) = \sum_{i=0}^{N-1} (I_i + dI_i) \cdot \cos\left(\varphi + d\varphi + \frac{2\pi i}{N}\right), \quad (2.11)$$

где N – количество фазовых шагов, I_i – зарегистрированные значения интенсивности в анализируемом элементе матрицы фотоприемника в процессе работы метода фазовых шагов и их погрешности dI_i . При $d\varphi \rightarrow 0$ и $dI_i \rightarrow 0$ и после исключения элементов второго порядка малости из (2.11):

$$d\varphi = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} dI_i \cdot \cos\left(\varphi + \frac{2\pi i}{N}\right)}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i \cdot \sin\left(\varphi + \frac{2\pi i}{N}\right)}. \quad (2.12)$$

Пусть регистрируемая фотоприемником интенсивность соответствует модулируемой источником излучения с амплитудой I :

$$I_i = \frac{I(1 + \sin(\varphi + \frac{2\pi i}{N}))}{2}. \quad (2.13)$$

Тогда:

$$d\varphi = \frac{2 \sum_{i=0}^{N-1} dI_i \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi i}{N})}{I \sum_{i=0}^{N-1} \sin(\varphi + \frac{2\pi i}{N}) \cdot (1 + \sin(\varphi + \frac{2\pi i}{N}))}, \quad (2.14)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{4\sigma_I^2}{I^2} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\cos(\varphi + \frac{2\pi i}{N}))^2}{(\sum_{i=0}^{N-1} \sin(\varphi + \frac{2\pi i}{N}) \cdot (1 + \sin(\varphi + \frac{2\pi i}{N})))^2}, \quad (2.15)$$

где σ_I – среднеквадратичное отклонение зарегистрированной интенсивности.

Учтем:

$$\sum_{i=0}^{N-1} (\cos(\varphi + \frac{2\pi i}{N}))^2 = \frac{N}{2}, \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sin(\varphi + \frac{2\pi i}{N}) \cdot (1 + \sin(\varphi + \frac{2\pi i}{N})) = \frac{N}{2}. \quad (2.17)$$

В результате:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sqrt{8}\sigma_I}{\sqrt{NI}}, \quad (2.18)$$

$$\sigma_{PG} = \frac{2^{M-0.5} \sigma_I}{\pi f \sqrt{NI}}. \quad (2.19)$$

Следовательно, для минимизации погрешности измерений разработанным методом фазовой триангуляции должен быть реализован поиск максимальной частоты фазовой модуляции интенсивности f и экспозиции фотоприемника, максимизирующей \sqrt{NI} , где I – амплитуда сигнала, зарегистрированного в процессе фазовых шагов, N – количество его элементов внутри динамического диапазона. Для минимизации σ_I амплитуда формируемого излучения установлена максимальной.

Разработан адаптивный к светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности метод поиска оптимальной частоты фазовой модуляции интенсивности f . Так как на интервал исходных значений фазы φ размером 2π приходится $\frac{2^{M-1}}{f}$ уровней бинарного Грей-кодирования, то для корректного расширения динамического диапазона фазового волнового фронта погрешность расшифровки структурированных изображений, реализующих бинарные коды Грея, G_{err} не должна превышать $\frac{2^{M-2}}{f}$. Следовательно, верхним пределом и оптимальным значением частоты фазовой модуляции интенсивности является f^* :

$$f^* = \frac{2^{M-2}}{G_{err}}, \quad (2.20)$$

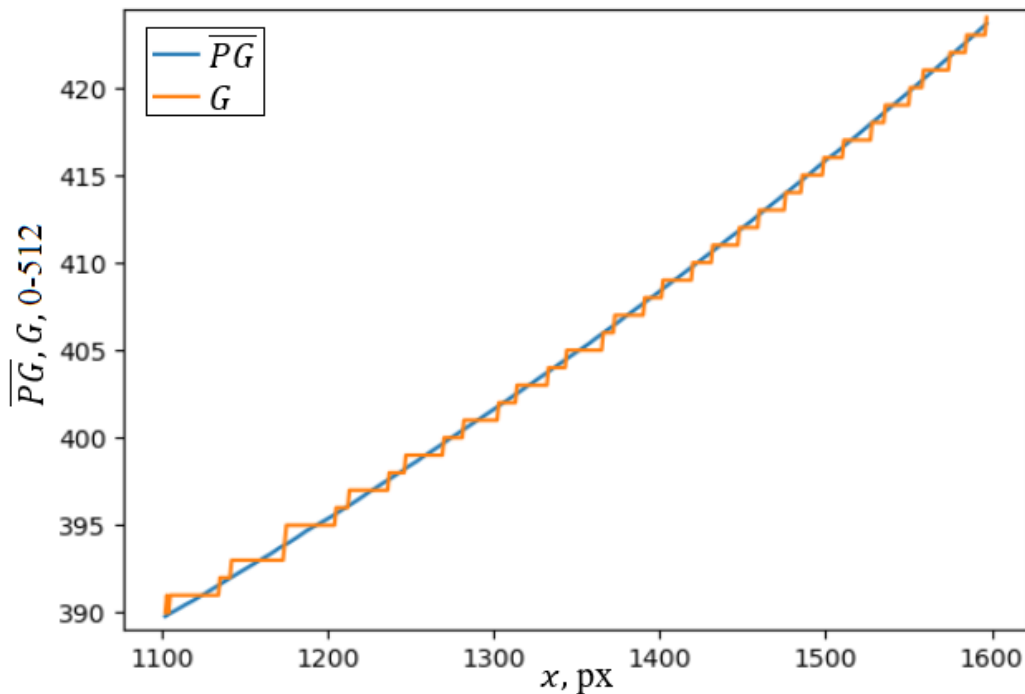
где 2^{M-1} – размерность кодирования фазы.

Оценка G_{err} может быть получена на основе результатов диагностики объекта разработанным методом фазовой триангуляции с заведомо низкой частотой фазовой модуляции интенсивности. На зарегистрированном фотоприемником изображении устанавливается горизонтальный срез пикселей $[x_s, x_e]$ (рис. 2.6, б), проходящий через участок поверхности и

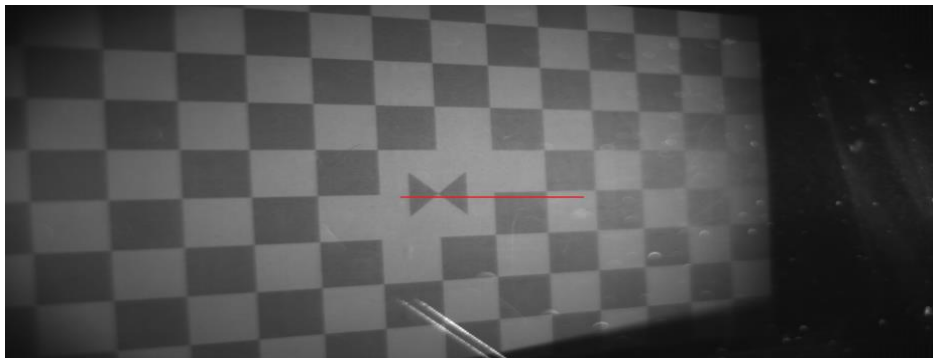
выполняется анализ отклонений измеренных значений кодов Грея $G_{(x,y)}$ от обработанных фильтром скользящего среднего с размером $2\Delta x + 1$ значений фазового распределения $PG_{(x,y)}$ (рис. 2.6, а):

$$\overline{PG}_{x,y} = \frac{\sum_{i=x-\Delta x}^{x+\Delta x} PG_{i,y}}{2\Delta x + 1}, \quad (2.21)$$

$$G_{err} = \max_{x_s \leq x \leq x_e} |\overline{PG}_{x,y} - G_{x,y}|. \quad (2.22)$$



а)



б)

Рис. 2.6. Анализ восстановленных значений фазового распределения и кода Грея (а) в установленном срезе пикселей фотоприемника (б).

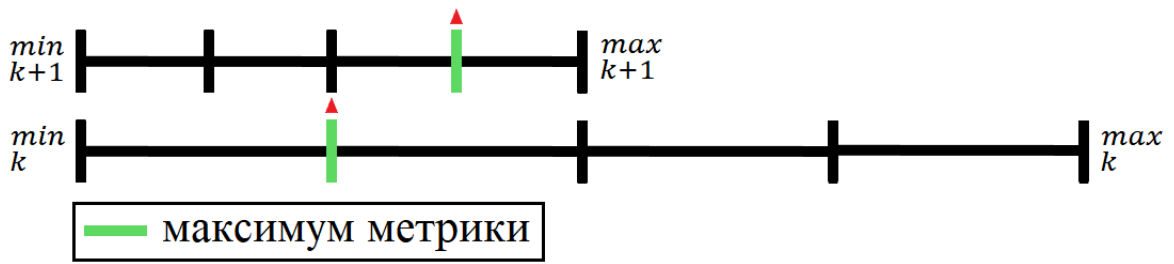


Рис. 2.7. Демонстрация работы метода итерационного интервального бинарного поиска оптимальной экспозиции фотоприемника.

Разработан адаптивный к светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности и амплитудно-частотной характеристике приёмно-передаточного тракта метод поиска оптимальной экспозиции фотоприемника. Алгоритм его работы основан на итерационном интервальном бинарном поиске экспозиции с наибольшим значением метрики M_D (рис. 2.7), для расчета которой источник проецирует, а фотоприемник регистрирует N структурированных изображений фазовых сдвигов с рабочей частотой фазовой модуляции интенсивности f^* :

$$M_D(e) = D(e) \sum_{x,y} \left(\max_{0 \leq i < N} I_{(x,y,i,e)}^{in} - \min_{0 \leq i < N} I_{(x,y,i,e)}^{in} \right) \sqrt{N_{(x,y,e)}}, \quad (2.23)$$

$$D(e) = \sum_{x,y} \begin{cases} 1, \text{ если } 0 < \min_{0 \leq i < N} I_{(x,y,i,e)}^{in} < \max_{0 \leq i < N} I_{(x,y,i,e)}^{in} < I^{max} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}, \quad (2.24)$$

$$N_{(x,y,e)} = \sum_{0 \leq j < N} \begin{cases} 1, \text{ если } \min_{0 \leq i < N} I_{(x,y,i,e)}^{in} < I_{(x,y,j,e)}^{in} < \max_{0 \leq i < N} I_{(x,y,i,e)}^{in} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}, \quad (2.25)$$

где I^{max} – верхняя граница динамического диапазона фотоприемника, (x, y) – координаты элемента матрицы фотоприемника, $I_{(x,y,i,e)}^{in}$ – зарегистрированное на i -ом шаге работы метода фазовых шагов значение интенсивности в элементе матрицы фотоприемника с координатами (x, y) при его экспозиции

е. Наличие множителя D в метрике M_D уменьшает количество регистрируемых областей поверхности объекта вне динамического диапазона.

В результате разработаны методы формирования, регистрации и обработки структурированных изображений фазовой триангуляции с адаптацией к светорассеивающим свойствам диагностируемой поверхности, амплитудно-частотной характеристике и нелинейности приемно-передаточной функции. Применение данных подходов позволит минимизировать погрешность дистанционного контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в процессе деформации.

2.2. Адаптивный метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения

При триангуляционном контроле на аэродинамических и климатических стендах трехмерных деформаций в виде роста и эрозии, имеющих сложную светорассеивающую структуру и светопреломляющий характер поверхности, формируемый световой поток рассеивается всей ее толщиной, а также передней и задними гранями. В результате в каждом пикселе матрицы фотоприемника регистрируется интегральная интенсивность от нескольких элементов матрицы источника оптического излучения с различными P_x -координатами (рис. 2.8).

Для восстановления трехмерных координат участков поверхности на основе калибровочных зависимостей $X(P_x)$, $Y(P_x)$, $Z(P_x)$: в каждом пикселе матрицы фотоприемника требуется расшифровка координаты P_x , соответствующей передней грани поверхности, на основе зарегистрированных в ходе измерения значений интенсивности.

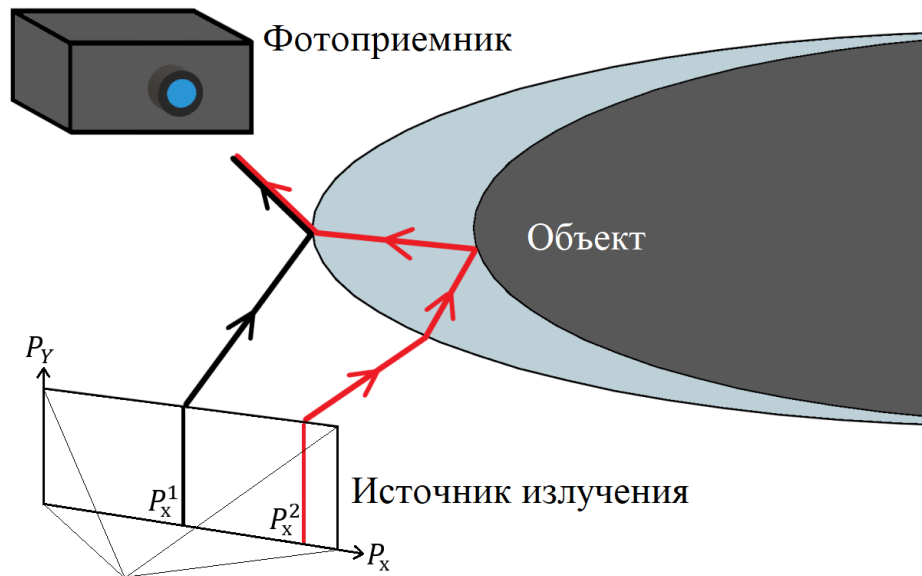


Рис. 2.8. Регистрация фотоприемником интегральной интенсивности от элементов матрицы источника излучения с координатами P_x^1 и P_x^2 при триангуляционном контроле светопреломляющей поверхности с 2 гранями.

Опишем процесс формирования и регистрации светового потока триангуляционной системой. Отдельная точка с координатами (P_x, P_y) в плоскости изображения источника излучения испускает свет, который можно характеризовать зависящей от времени комплексной величиной $A_0(P_x, P_y, t)$. Данный свет падает на точку передней грани поверхности объекта с координатами (ξ, η) в виде волны A_1 :

$$A_1(\xi, \eta, P_x, P_y, t) = A_0(P_x, P_y, t - \delta_1) \cdot F(\xi, \eta, P_x, P_y), \quad (2.26)$$

где F – функция размытия или импульсный отклик оптической системы формирования изображения, δ_1 – временная задержка, зависящая от (P_x, P_y) и (ξ, η) . После взаимодействия A_1 с поверхностью объекта, свет, направленный из точки (ξ, η) в точку с координатами (x, y) в плоскости изображения фотоприемника, может быть описан в виде волны A_2 :

$$A_2(\xi, \eta, P_x, P_y, t) = A_1(\xi, \eta, P_x, P_y, t) \cdot B(P_x, P_y, \xi, \eta, x, y), \quad (2.27)$$

где B – амплитудный коэффициент, определяющийся направлением падения волны $(P_X, P_Y) \rightarrow (\xi, \eta)$, светорассеивающими свойствами светопреломляющей поверхности и направлением регистрации волны $(\xi, \eta) \rightarrow (x, y)$. В результате световая волна, испускаемая точкой источника с координатами (P_X, P_Y) и достигающая точки с координатами (x, y) в плоскости изображения фотоприемника, имеет вид:

$$A_{res}(P_X, P_Y, x, y, t) = \iint_{-\infty}^{+\infty} K(x, y, \xi, \eta) \cdot B(P_X, P_Y, \xi, \eta, x, y) \cdot F(\xi, \eta, P_X, P_Y) \cdot A_0(P_X, P_Y, t - \delta_1 - \delta_2) d\xi d\eta, \quad (2.28)$$

где K – функция размытия или импульсный отклик оптической системы регистрации изображения, δ_2 – временная задержка, зависящая от (x, y) и (ξ, η) . В результате получим выражение, описывающее в самом общем виде интенсивность, регистрируемую в элементе матрицы фотоприемника с координатами (x, y) :

$$I(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \langle |A_{res}(P_X, P_Y, x, y, t)|^2 \rangle dP_X dP_Y. \quad (2.29)$$

Следовательно, зная A_0 , F , K и B может быть вычислено распределение регистрируемой интенсивности. Однако в случае контроля трехмерной геометрии светопреломляющей поверхности крайне затруднительно вычислить параметр B . Это связано с множественным перерасеянием светового потока внутри поверхности, а также динамичным изменением ее трехмерной геометрии и светорассеивающих свойств в процессе деформации. Вследствие отсутствия информации о распределении регистрируемой интенсивности результаты диагностики светопреломляющих поверхностей классическими методами оптической триангуляции, например

на основе фазовой модуляции интенсивности, будут иметь значительные искажения.

При этом существенными ограничениями известных методов триангуляционного контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей являются тепловое и механическое воздействие на исследуемый объект [69-75], узкая область применения [71, 76] и сложность использования в условиях нелинейных оптических искажений [77, 78].

Для решения данной проблемы в рамках работы разработан адаптивный метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения. Цель работы данного метода – обеспечить высокоточные измерения трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов в процессах формирования нароста или эрозии, которые могут иметь как непрозрачную, так и светопреломляющую поверхность.

Принцип работы предложенного метода основан на многокадровой структурированной засветке, оптической триангуляции и обработке зарегистрированных изображений для определения пространственных координат видимых передней и задней граней диагностируемой поверхности.

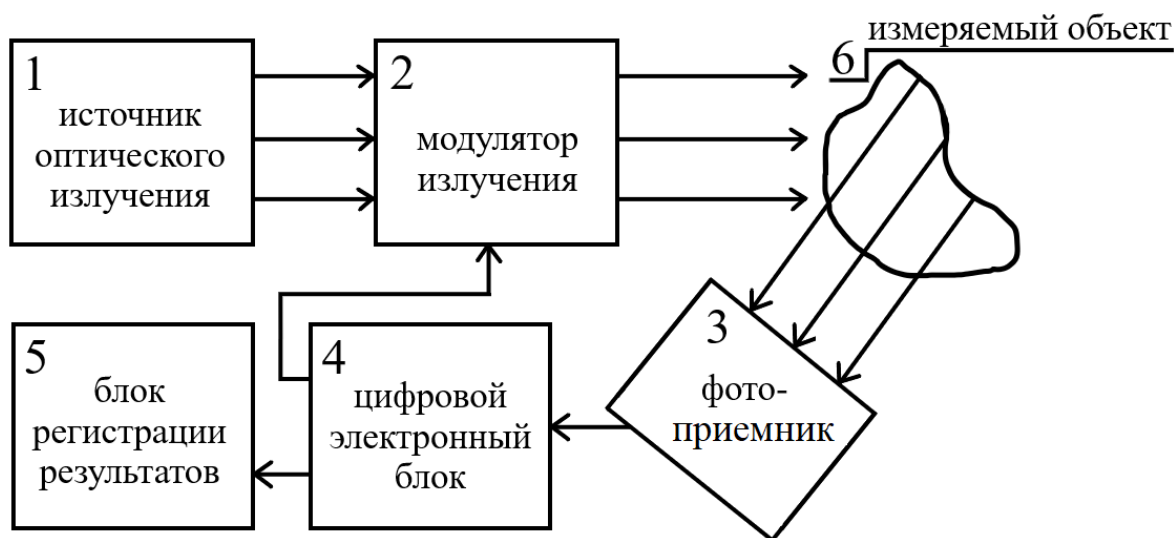


Рис. 2.9. Схема устройства, реализующего адаптивный метод оптической триангуляции на основе динамического светового сечения.

Схема устройства (рис. 2.9), реализующего разработанный метод, содержит источник оптического излучения 1, пространственный модулятор интенсивности излучения 2, фотоприемник 3, цифровой электронный блок 4, блок регистрации результатов 5, измеряемый объект 6. Вход цифрового электронного блока 4 соединен с выходом фотоприемника 3, а выходы соединены с входами модулятора излучения 2 и блока регистрации результатов 5, соответственно. Работа данного устройства включает сбор и обработку промежуточных измерительных данных.

Метод работает следующим образом. На исследуемую поверхность последовательно проецируют серию структурированных изображений. Каждое изображение представляет собой 2 прямоугольника: черный и белый, имеющих общую вертикальную границу (рис. 2.10). Номер структурированного изображения равен горизонтальной координате границы между черным и белым прямоугольниками. Фотоприемник регистрирует все изображения, рассеянные исследуемой поверхностью, и сохраняет их в памяти для дальнейшей обработки.



Рис. 2.10. Пример формируемого структурированного изображения в адаптивном методе оптической триангуляции на основе динамического светового сечения.

После регистрации всех изображений для каждого пикселя матрицы фотоприемника формируется зависимость зарегистрированной интенсивности от номера сформированной засветки. Далее выполняется поиск порядкового номера засветки, характеризующейся резким скачком интенсивности. Данный факт определяет переход формируемой засветки от белого прямоугольника к черному. С помощью этого определяется

горизонтальная координата P_x матрицы источника оптического излучения, соответствующая анализируемому пикселу матрицы фотоприемника. В случае нескольких светорассеивающих поверхностей, которые наблюдаются с одного ракурса фотоприемника, на полученной зависимости зарегистрированной интенсивности от номера засветки будет несколько резких скачков интенсивности.

Опишем практическую реализацию предложенного метода. Источник оптического излучения на P_x -шаге формирует структурированную засветку в виде черного прямоугольника с координатами $((0,0), (P_x, S_Y))$ и белого с координатами $((P_x, 0), (S_X, S_Y))$, где $(S_X \times S_Y)$ – разрешение матрицы источника оптического излучения. Для каждого элемента матрицы фотоприемника с координатами (x, y) строим зависимость $I_{(x,y)}(P_x)$ зарегистрированной в нем интенсивности от порядкового номера засветки (рис. 2.11).

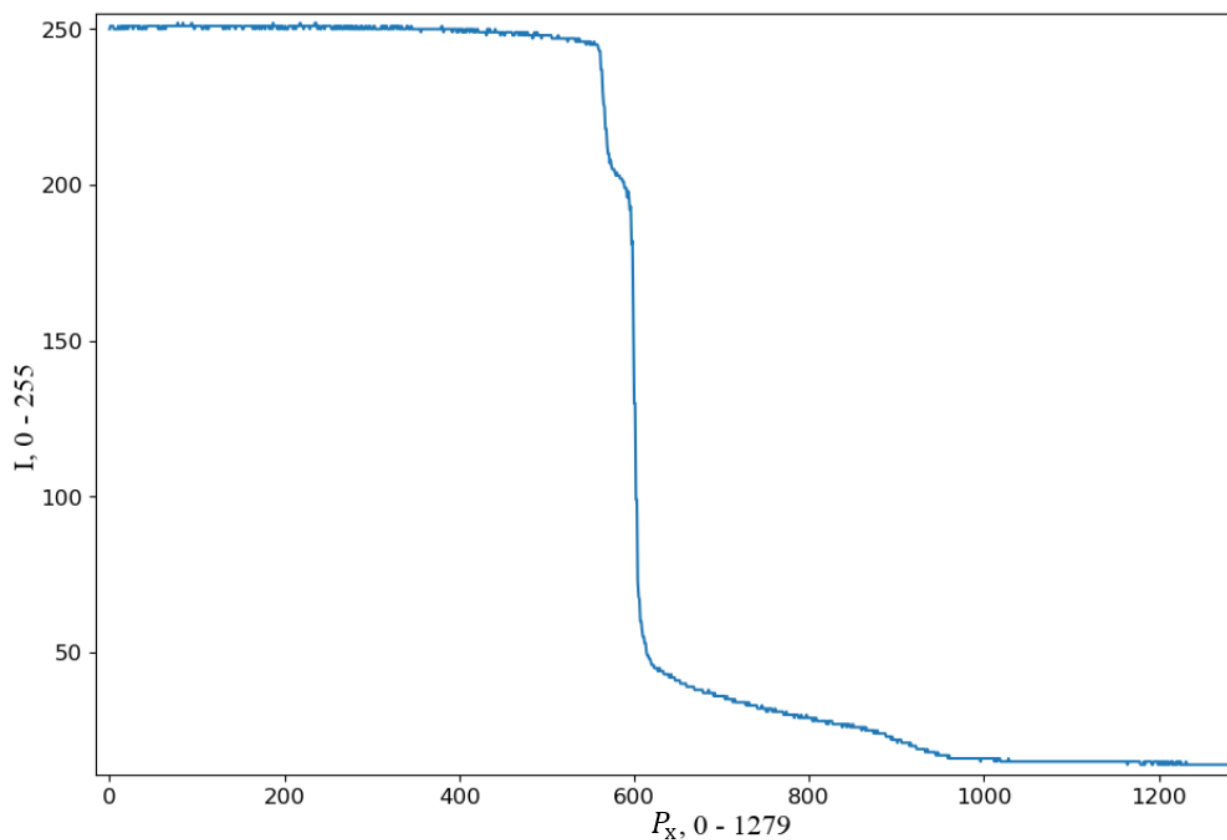


Рис. 2.11. Зависимость $I_{(x,y)}(P_x)$ зарегистрированной интенсивности от координаты P_x границы между черным и белым прямоугольниками на формируемом структурированном изображении с разрешением $S_X = 1280$.

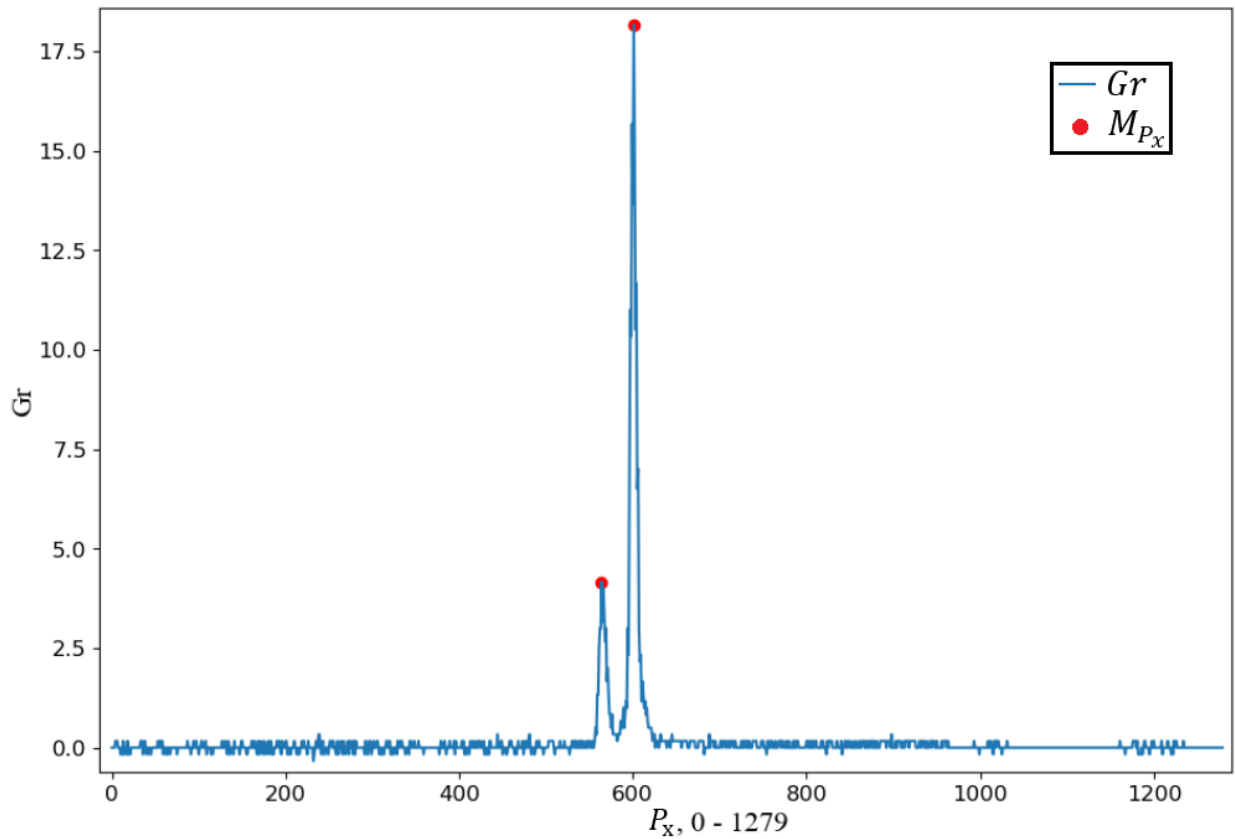


Рис. 2.12. Пример поиска значений M_{P_x} – локальных максимумов $Gr_{I(x,y)}$.

Далее восстанавливаем массив $Gr_{I(x,y)}$ значений локального градиента на полученной зависимости $I_{(x,y)}(P_x)$, выполняем поиск M_{P_x} – локальных максимумов $Gr_{I(x,y)}$ (рис. 2.12) и их сохранение в массив A :

$$Gr_{I(x,y)}(P_x) = \frac{I_{(x,y)}(P_x - \Delta) - I_{(x,y)}(P_x + \Delta)}{2\Delta}, \quad (2.30)$$

$$(x, y, M_{P_x}) \in A, \text{ если } Gr_{I(x,y)}(M_{P_x}) > th \text{ и } M_{P_x} = \operatorname{argmax}(Gr_{I(x,y)}), \quad (2.31)$$

где 2Δ – размер области расчета локального градиента интенсивности, th – установленное пороговое значение. В случае, если локальных максимумов градиента несколько, то это говорит о регистрации нескольких граней светопреломляющей поверхности. После сохранения очередного значения M_{P_x} обновляем анализируемый массив $Gr_{I(x,y)}$:

$$Gr_{I(x,y)}(i) := 0, \forall i \in [M_{P_x} - w, M_{P_x} + w], \quad (2.32)$$

где $(2w + 1)$ – ширина пика максимума Gr , определяющаяся фокусировкой изображения источника оптического излучения.

В итоге формируется массив A , каждый элемент которого состоит из трех значений: (x, y, M_{P_x}) . На основе каждого элемента массива A могут быть восстановлены трехмерные координаты (X, Y, Z) регистрируемого участка поверхности. Для этого к координате M_{P_x} применяются калибровочные зависимости $X(P_x)$, $Y(P_x)$, $Z(P_x)$, соответствующие пикселу матрицы фотоприемника с координатами (x, y) . Массив всех восстановленных трехмерных координат описывает трехмерную геометрию как передней, так и задних граней поверхности объекта. С помощью ручной фильтрации реализуется восстановление трехмерной геометрии передней грани поверхности объекта, соответствующей результату его трехмерной деформации.

Для повышения точности контроля трехмерной геометрии с помощью описанного метода дополнительно реализовано субпиксельное уточнение найденных координат M_{P_x} локальных максимумов градиента. Для этого значения локального градиента вблизи M_{P_x} аппроксимируются квадратичной функцией, координата вершины которой \tilde{M}_{P_x} сохраняется вместо M_{P_x} в элемент массива A : $(x, y, M_{P_x}) \rightarrow (x, y, \tilde{M}_{P_x})$:

$$\tilde{M}_{P_x} = -\frac{b}{2a}, \quad (2.33)$$

$$a = \frac{Gr_{I(x,y)}(M_{P_x} + 1) - 2Gr_{I(x,y)}(M_{P_x}) + Gr_{I(x,y)}(M_{P_x} - 1)}{2}, \quad (2.34)$$

$$b = Gr_{I(x,y)}(M_{P_x}) - Gr_{I(x,y)}(M_{P_x} - 1) - a(2M_{P_x} - 1). \quad (2.35)$$

В результате разработан новый метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения и адаптивной декомпозиции регистрируемого сигнала от аддитивного светового потока. Предложенный метод может быть использован для дистанционного, неразрушающего контроля трехмерных деформаций в виде нароста и эрозии на действующих аэродинамических и климатических экспериментальных стендах в задачах машиностроения и энергетики.

2.3. Адаптивный к текстуре поверхности комплекс методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций

Для применения разработанных триангуляционных методов с использованием структурированного освещения на действующих силовых, аэродинамических и климатических экспериментальных стендах требуется обеспечение возможности контроля деформаций диагностируемой поверхности на основе результатов измерения ее трехмерной геометрии.

Наиболее универсальный метод контроля изменения трехмерной геометрии поверхности может быть реализован на основе детектирования смещений ее участков на зарегистрированных фотоприемником изображениях до и после деформации и их преобразования в трехмерные векторы [79-81] с использованием калибровочных данных. Особенностью данного подхода является требование наличия характерных, отличительных особенностей в текстуре диагностируемой поверхности. В случае их отсутствия на поверхность могут быть нанесены специальные шаблоны или покрытия, что зачастую допустимо в опытно-конструкторских испытаниях на силовых экспериментальных стендах. Однако в задачах контроля нароста и эрозии на аэродинамических и климатических экспериментальных стендах текстура исследуемой поверхности, как правило, не содержит характерных, отличительных особенностей, а нанесение на нее специальных шаблонов и покрытий делает невозможным дальнейшее продолжение эксперимента.

Следовательно, требуется разработка адаптивного к текстуре поверхности комплекса методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций объектов на действующих силовых, аэродинамических и климатических экспериментальных стендах.

Предложен метод триангуляционного контроля трехмерных деформаций поверхностей с наличием характерных, отличительных особенностей в текстуре. Реализовано детектирование смещений участков поверхности на зарегистрированных фотоприемником изображениях до и после деформации и их преобразование в трехмерное пространство.

Детектирование смещений участков поверхности на изображении фотоприемника реализовано на основе пространственно-временного корреляционного анализа. Анализируется область изображения объекта до деформации размером $(W \times H)$ с координатами центра (x_0, y_0) и распределением интенсивности $I_0(x, y)$. На изображении объекта после деформации рассматриваются области размером $(W \times H)$ с распределением интенсивности $I_d(x, y)$ и координатами центра (x_i, y_i) , лежащими в интервалах по X : $[x_0 - MaxShift_X; x_0 + MaxShift_X]$ и по Y : $[y_0 - MaxShift_Y; y_0 + MaxShift_Y]$, где $MaxShift_X$ и $MaxShift_Y$ – установленные оператором значения максимальных сдвигов участков поверхности на изображении фотоприемника. Для каждой рассматриваемой области рассчитывается и сохраняется значение коэффициента корреляции Пирсона:

$$r(I_0, I_d) = \frac{c(I_0, I_d)}{\sqrt{S_{I_0}^2 S_{I_d}^2}}, \quad (2.36)$$

$$c(I_0, I_d) = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} (I_0(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) - \bar{I}_0)(I_d(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - \bar{I}_d), \quad (2.37)$$

$$s_{I_0}^2 = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} (I_0(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) - \bar{I}_0)^2, \quad (2.38)$$

$$s_{I_d}^2 = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} (I_d(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - \bar{I}_d)^2, \quad (2.39)$$

где $\Delta x \in [-\frac{W}{2}; \frac{W}{2}]$, $\Delta y \in [-\frac{H}{2}; \frac{H}{2}]$, \bar{I}_0 и \bar{I}_d – средние значения интенсивности в областях на изображениях объекта до и после деформации, соответственно. В интервалах по X : $[x_0 - MaxShift_x; x_0 + MaxShift_x]$ и по Y : $[y_0 - MaxShift_y; y_0 + MaxShift_y]$ реализован поиск координат (x_d, y_d) точки с максимальным значением коэффициента корреляции Пирсона r , которые принимаются в качестве оценки координаты анализируемого участка поверхности на изображении после деформации.

Восстановление трехмерных векторов деформации реализовано на основе найденных смещений участков поверхности на изображении фотоприемника $(x_0, y_0) \rightarrow (x_d, y_d)$ и информации о трехмерных координатах объекта до (X_0, Y_0, Z_0) и после (X_d, Y_d, Z_d) деформации в соответствующих матричных элементах. Восстановление данной информации реализовано в процессе триангуляционного измерения трехмерной геометрии поверхности. Достоверность найденных трехмерных векторов деформации $(X_0, Y_0, Z_0) \rightarrow (X_d, Y_d, Z_d)$ повышена с помощью их пороговой фильтрации на основе коэффициента корреляции Пирсона для смещения $(x_0, y_0) \rightarrow (x_d, y_d)$.

Для разработки методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций в виде нароста и эрозии на действующих аэродинамических и климатических экспериментальных стендах учтена особенность соответствующих исследований – как правило, наличие выделенного направления контроля изменения трехмерной геометрии поверхности (рис. 2.13).

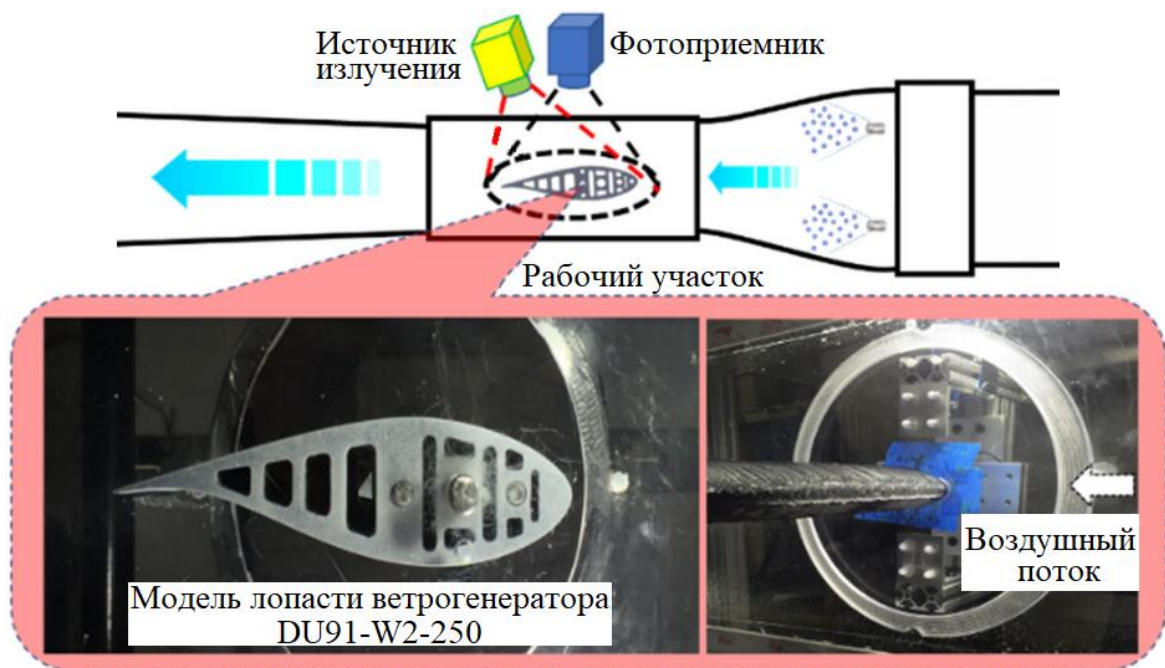


Рис. 2.13. Рабочий участок аэродинамического стенда ISU-IRT (США) для исследования процессов обледенения моделей лопастей ветрогенератора.

Однако поиск смещений трехмерных точек исходной поверхности в заданном направлении связан с проблемой ограниченного пространственного разрешения результатов измерения трехмерной геометрии триангуляционной системой (рис. 2.14, а). Данная проблема может быть решена с помощью восстановления и анализа полигональной поверхности на основе набора измеренных трехмерных точек (рис. 2.14, б). Применения для этого классических методов восстановления полигональной поверхности [94-98] ограничено сложностью обеспечения достоверности связей между трехмерными точками. Это связано с тем, что диагностируемые объекты, например, покрытые наледью, могут иметь сильную локальную неоднородность высоты, а классические методы восстановления полигональной поверхности, как правило, реализуют соединение в полигоны трехмерных точек, близко расположенных в пространстве. В результате трехмерные точки, соответствующие локальным максимумам и минимумам высоты диагностируемой поверхности, могут быть интерпретированы как шум и исключены.

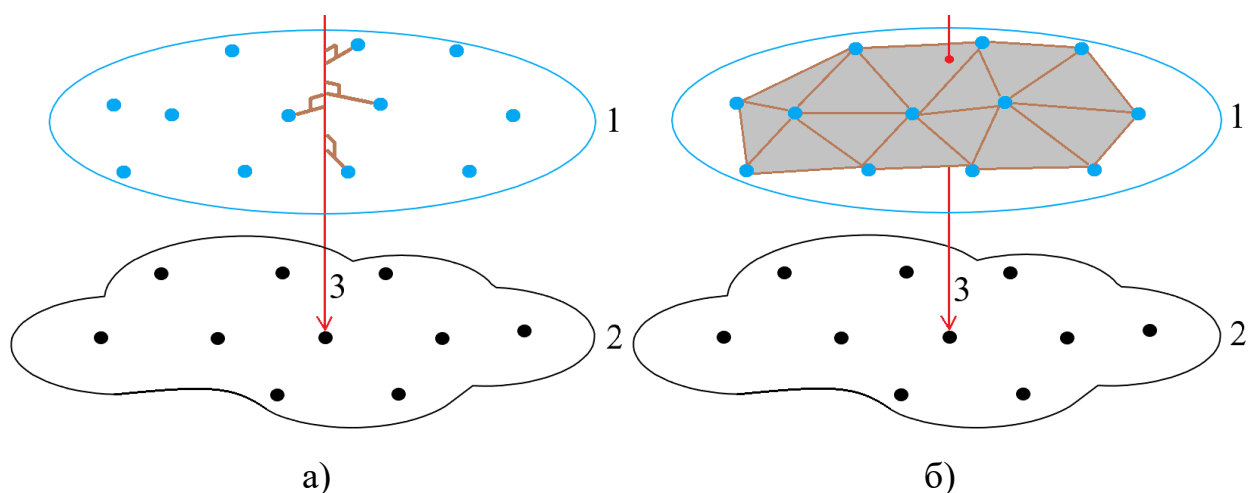


Рис. 2.14. Поиск в заданном направлении (3) точки исходной поверхности (1), соответствующей точке после деформации (2) в случаях восстановления полигональной поверхности (б) и ее отсутствия (а).

Для решения данной проблемы разработан метод многопараметрического восстановления полигональной поверхности объекта на основе результата измерения его трехмерной геометрии триангуляционной системой на основе структурированного освещения. Входными данными для алгоритма, реализующего разработанный метод, является массив, каждый элемент которого включает 7 значений: $(X, Y, Z, x, y, I^{min}, I^{max})$, где (X, Y, Z) – трехмерные координаты участка поверхности, (x, y) – координаты элемента матрицы фотоприемника, в котором он был зарегистрирован, I^{min} и I^{max} – минимальное и максимальное значения интенсивности, зарегистрированные в элементе матрицы фотоприемника с координатами (x, y) в процессе измерения трехмерной геометрии триангуляционной системой. Реализующий разработанный метод алгоритм включает следующие итерации:

- 1) исключение из входного массива точек, для которых размер диапазона зарегистрированных значений интенсивности $(I^{max} - I^{min})$ меньше порогового значения;
- 2) формирование преобразования $P(x, y) = (X, Y, Z)$;
- 3) фильтрация граничных точек на основе порогового значения th и Евклидовой метрики d :

$$P(x, y) := \emptyset, \text{ если } \frac{\max_{-1 \leq dx, dy \leq 1, dx \neq dy} d(P(x, y), P(x + dx, y + dy))}{\min_{-1 \leq dx, dy \leq 1, dx \neq dy} d(P(x, y), P(x + dx, y + dy))} > th; \quad (2.40)$$

- 4) итерирование по координатам (x, y) матрицы фотоприемника, таким что $P(x^*, y^*) \neq \emptyset \forall x^* \in [x - 1, x + 1], y^* \in [y - 1, y + 1]$, и восстановление полигонов поверхности:

$$Polygon_{(x,y)}^1 = \{P(x, y), P(x + 1, y), P(x + 1, y + 1)\}, \quad (2.41)$$

$$Polygon_{(x,y)}^2 = \{P(x, y), P(x + 1, y + 1), P(x, y + 1)\}. \quad (2.42)$$

В предложенной реализации восстановления полигонов поверхности все пары соединенных отрезками трехмерных точек соответствуют соседним элементам матрицы фотоприемника и, следовательно, соседним участкам диагностируемой поверхности. Таким образом, исключены недостоверные связи между трехмерными точками в полигональной поверхности при условии корректной работы триангуляционной системы контроля трехмерной геометрии объектов с использованием структурированного освещения.

В результате разработаны методы триангуляционного контроля в заданном направлении трехмерных деформаций поверхностей без наличия в текстуре характерных, отличительных особенностей. Их отличие заключается в масштабах контроля трехмерных деформаций: локальная точка, участок поверхности и плоское сечение.

В разработанных методах контроля трехмерных деформаций на масштабах участка поверхности и локальной точки после завершения измерений триангуляционной системой реализовано восстановление полигональной поверхности до деформации. Для каждой измеренной трехмерной точки поверхности после деформации организован поиск ближайшего в заданном направлении полигона исходной поверхности (рис.

2.14, б). Расстояние до точки пересечения с данным полигоном соответствует значению деформации в анализируемой трехмерной точке. Так как измеренные триангуляционной системой трехмерные точки поверхности соответствуют элементам матрицы фотоприемника, то представление восстановленных значений локальной деформации на зарегистрированном изображении объекта формирует поле деформаций участка поверхности.

В разработанном методе контроля трехмерных деформаций на масштабе плоского сечения реализовано восстановление полигональных поверхностей диагностируемого объекта на основе результатов триангуляционных измерений, соответствующих разным моментам времени. Для каждой восстановленной поверхности реализовано восстановление контура, сформированного отрезками – пересечениями ее полигонов с заданной плоскостью $aX + bY + cZ + d = 0$ (рис. 2.15). Найденные контуры соответствуют плоским срезам трехмерного профиля диагностируемой поверхности в разные моменты времени.

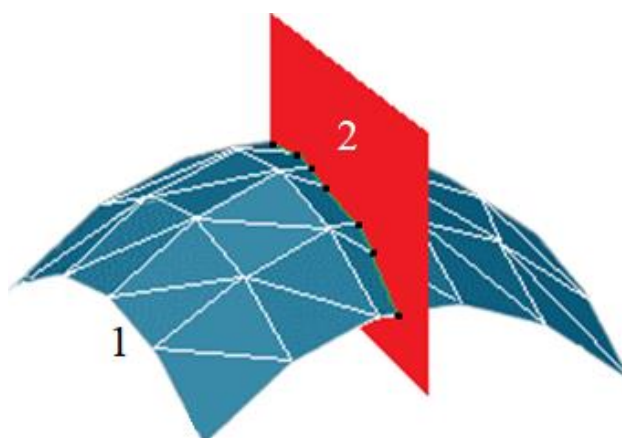


Рис. 2.15. Поиск точек пересечения заданной плоскости (2) с полигонами восстановленной поверхности (1).

В результате разработан комплекс методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций объектов в машиностроении и энергетике с возможностью адаптации к текстуре диагностируемой поверхности.

2.4. Анализ погрешностей адаптивных методов оптической триангуляции объектов в машиностроении и энергетике

Анализ погрешностей разработанных адаптивных методов оптической триангуляции является важной частью диссертационной работы, так как позволяет учитывать границы применимости предложенных подходов.

Во-первых, оценим погрешности измерения горизонтальной координаты P_X матрицы источника оптического излучения разработанными триангуляционными методами.

С учетом выражений (2.7) и (2.19) может быть оценено среднеквадратичное отклонение координаты P_X , измеренной разработанным методом фазовой триангуляции:

$$\sigma_{P_X}^{PT} = \frac{S\sqrt{2}\sigma_I}{\pi f\sqrt{NI}}, \quad (2.43)$$

где S – горизонтальное разрешение матрицы источника оптического излучения, f – частота фазовой модуляции интенсивности, N – количество фазовых шагов, I – диапазон регистрируемых фотоприемником значений интенсивности, σ_I – их среднеквадратичное отклонение. Пусть $I = 255$, $\sigma_I = \frac{1}{3}$, $N = 50$, $f = 50$, $S = 1280$. Тогда $\sigma_{P_X}^{PT} \approx 2.1 \cdot 10^{-3}$ пикселей матрицы проектора. Полученная аналитическая оценка верифицирована с помощью компьютерного моделирования. С выше установленными значениями f , S и N сформировано фазовое распределение $\varphi(P_X) = \frac{2\pi f P_X}{S}$. Для каждого элемента $\varphi(P_X)$ и каждого сдвига $\Delta\varphi_i = \frac{2\pi i}{N}$ фазовой функции с помощью выражения (1.2) восстановлены целочисленные значения регистрируемой интенсивности $I_{(P_X,i)}$ в диапазоне $[0; 255]$. Для каждого P_X на основе массива I_{P_X} восстановлено значение начальной фазы с помощью разработанного

метода и классического подхода на основе ортогональных отношений тригонометрических функций [43]. Для обоих методов среднеквадратичное отклонение восстановленного от исходного фазового распределения составило $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ радиан, а среднеквадратичное отклонение координаты $P_x \sim 2 \cdot 10^{-3}$ пикселей матрицы проектора.

Таким образом, показано, что разработанный метод фазовой триангуляции при линейной приемно-передаточной функции обладает схожими метрологическими характеристиками с известными методами расшифровки фазового распределения. Однако в реальных условиях разработанный метод фазовой триангуляции обеспечивает большую достоверность результатов измерений благодаря адаптивной компенсации нелинейности приемно-передаточной функции. Это подтверждено в ходе компьютерного моделирования его работы при различных параметрах γ нелинейности приемно-передаточной функции (рис. 2.16):

$$I_i^{out} = 255 \cdot \frac{1 + \sin\left(\varphi_0 + \frac{2\pi i}{N}\right)}{2}, \quad (2.44)$$

$$I^{in}(I^{out}) = \begin{cases} 255, & \text{если } I^{out} > 150 \\ 255 \cdot \left(\frac{I^{out}}{150}\right)^\gamma, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (2.45)$$

где количество фазовых шагов $N = 50$, среднеквадратичное отклонение значений интенсивности $\sigma_I = 15$. По сравнению с известным методом расшифровки фазового распределения на основе ортогональных отношений тригонометрических функций показано уменьшение погрешности измерений предложенным подходом в 2 раза, а также в 11 раз при статистической фильтрации входных значений интенсивности на основе массива из 50 элементов.

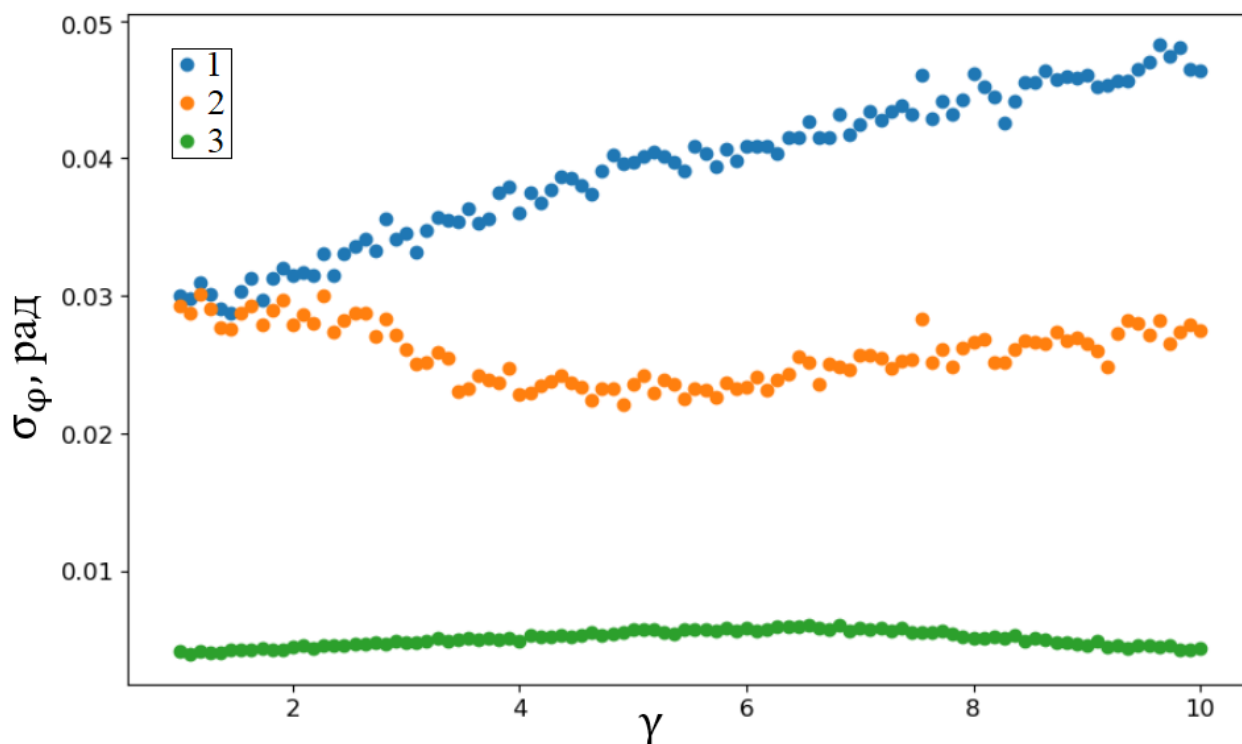


Рис. 2.16. Зависимость от параметра нелинейности приемно-передаточной функции среднеквадратичного отклонения фазового распределения, восстановленного методами фазовой триангуляции: на основе ортогональных отношений тригонометрических функций (1), разработанным (2) и разработанным с повышенной устойчивостью к случайным аддитивным помехам (3).

Для оценки среднеквадратичного отклонения $\sigma_{P_x}^{SCT}$ координаты P_x , измеренной разработанным методом оптической триангуляции на основе динамического светового сечения, пусть слева и справа вблизи локального максимума зависимости $Gr(P_x)$ ее можно описать линейной функцией координаты P_x . Тогда верно:

$$\sigma_{P_x}^{SCT} = \frac{\sigma_{Gr}}{|Gr'_{P_x}|}, \quad (2.46)$$

где σ_{Gr} – среднеквадратичное отклонение измеренной величины локального градиента интенсивности, Gr'_{P_x} – первая производная зависимости $Gr(P_x)$ вблизи локального максимума. С учетом выражения (2.30), погрешностей

регистрируемых значений интенсивности и закона сложения случайных ошибок:

$$\sigma_{Gr} = \frac{\sigma_I}{\sqrt{2\Delta}}, \quad (2.47)$$

где 2Δ – размер области расчета локального градиента интенсивности, σ_I – среднеквадратичное отклонение зарегистрированных значений интенсивности. Тогда получим итоговое выражение для оценки $\sigma_{P_x}^{SCT}$:

$$\sigma_{P_x}^{SCT} = \frac{\sigma_I}{\sqrt{2}|Gr'_{P_x}|\Delta}. \quad (2.48)$$

Пусть диапазон регистрируемых фотоприемником значений интенсивности $I = 255$, $\Delta = 3$. При данных параметрах диагностики светопреломляющей поверхности характерными значениями σ_I и Gr'_{P_x} являются: $\sigma_I = 0.765$, $Gr'_{P_x} = 0.2$. Тогда $\sigma_{P_x}^{SCT}$ составляет на уровне 0.9 пикселей матрицы проектора.

С использованием $\sigma_{P_x}^{PT}$ и $\sigma_{P_x}^{SCT}$ оценим погрешность контроля трехмерной геометрии объектов оптико-электронной системой, реализующей разработанные адаптивные методы оптической триангуляции. Для определенности будем анализировать погрешность измерения Z -координаты участков диагностируемой поверхности. Пусть калибровка данной системы основана на восстановлении в пикселах (x, y) матрицы фотоприемника зависимостей пространственных координат (X, Y, Z) от координаты P_x матрицы источника оптического излучения (рис. 1.4). В Главе 1 обоснована перспективность применения данного метода калибровки для компенсации нелинейных оптических искажений.

На основе калибровочных соответствий $Z_1 \leftrightarrow P_{x1}$ и $Z_2 \leftrightarrow P_{x2}$, и измеренной горизонтальной координаты матрицы источника оптического излучения P_x^* может быть вычислено значение координаты Z :

$$Z^* = \frac{(Z_2 - Z_1)P_x^* + Z_1P_{x_2} - Z_2P_{x_1}}{P_{x_2} - P_{x_1}}. \quad (2.49)$$

Обозначим $dz_{1,2}$ и $dp_{1,2}$ – погрешности измерений $Z_{1,2}$ и $P_{x_{1,2}}$, dp_0 – погрешность измерения P_x^* . Тогда с учетом погрешностей:

$$Z^* = A_1 + A_2 - A_3, \quad (2.50)$$

$$A_1 = \frac{(Z_2 \pm dz_2 - Z_1 \mp dz_1)(P_x^* \pm dp_0)}{P_{x_2} \pm dp_2 - P_{x_1} \mp dp_1}, \quad (2.51)$$

$$A_2 = \frac{(Z_1 \pm dz_1)(P_{x_2} \pm dp_2)}{P_{x_2} \pm dp_2 - P_{x_1} \mp dp_1}, \quad (2.52)$$

$$A_3 = \frac{(Z_2 \pm dz_2)(P_{x_1} \pm dp_1)}{P_{x_2} \pm dp_2 - P_{x_1} \mp dp_1}. \quad (2.53)$$

Пусть для определенности $P_x^* = \frac{P_{x_2} + P_{x_1}}{2}$. Тогда при исключении из (2.50) величин второго порядка малости получим оценку Z -координаты:

$$Z^* = \frac{Z_1 + Z_2}{2} + dZ, \quad (2.54)$$

$$dZ = \pm dz + \frac{\Delta Z}{\Delta P_x} (\pm dp_0 \mp \frac{dp_1}{2} \mp \frac{dp_2}{2}), \quad (2.55)$$

где $\Delta Z = Z_2 - Z_1$, $\Delta P_x = P_{x_2} - P_{x_1}$, dz – погрешность измерений Z -координаты в калибровочных данных, dZ – погрешность измерения Z -координаты участка поверхности.

С учетом закона сложения случайных получено аналитическое выражение для оценки среднеквадратичного отклонения измеренной адаптивной триангуляционной системой Z -координаты участка поверхности:

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{Z_{calibr}}^2 + \left(\frac{\Delta Z}{\Delta P_x}\right)^2 \cdot \left(\frac{(\sigma_{P_x}^{Calibr})^2}{2} + (\sigma_{P_x}^{Msr})^2\right)}, \quad (2.56)$$

где $\sigma_{Z_{calibr}}$ – среднеквадратичное отклонение Z -координаты в калибровочных данных, $\sigma_{P_x}^{Calibr}$ и $\sigma_{P_x}^{Msr}$ – среднеквадратичные отклонения координаты P_x матрицы источника оптического излучения в калибровочных данных и результатах измерений диагностируемого объекта, ΔZ и ΔP_x – шаги калибровки по Z и координате P_x матрицы источника оптического излучения, соответственно.

Пусть в процессе калибровки контроль Z -координаты реализован вручную с помощью механизма линейного перемещения, поворот которого на 360° соответствует сдвигу калибровочной мишени вдоль оси Z на 1 мм. Пусть абсолютная погрешность контроля угла поворота составляет $\pm 5^\circ$, что соответствует абсолютной погрешности контроля Z -координаты ± 14 мкм и ее среднеквадратичному отклонению $\sigma_{Z_{calibr}}$ на уровне 5 мкм.

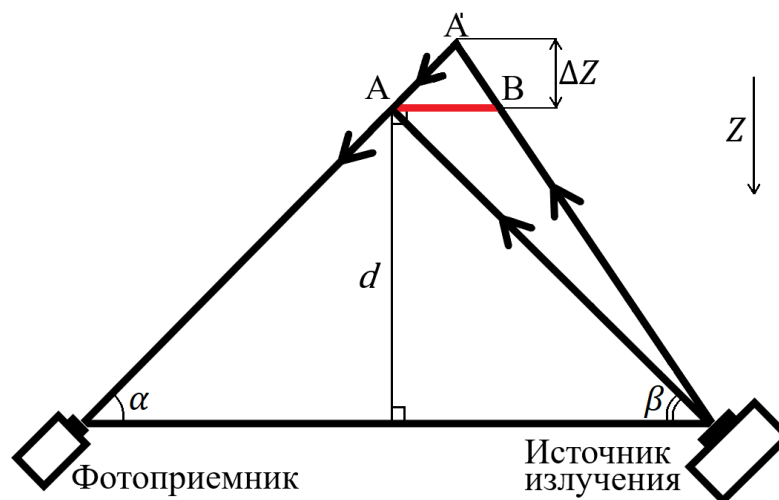


Рис. 2.17. Шаг калибровки триангуляционной системы.

Для оценки $\frac{\Delta Z}{\Delta P_x}$ пусть ось Z перпендикулярна основанию триангуляционной системы (рис. 2.17). Оценим ΔP_x при смещении точки $A \rightarrow A'$ на расстояние ΔZ вдоль оси Z . Для этого учтем, что на весь объект размером L приходится количество пикселей матрицы проектора, соответствующее его разрешению S . Следовательно, ΔP_x может быть оценено:

$$\Delta P_x = S \frac{AB}{L}, \quad (2.57)$$

$$AB = (ctg\alpha + ctg\beta) \frac{\Delta Z}{1 + \frac{\Delta Z}{d}}, \quad (2.58)$$

где d – расстояние от триангуляционного модуля до объекта, α и β – углы между основанием и оптическими осями фотоприемника и источника оптического излучения, соответственно. При $\frac{\Delta Z}{d} \rightarrow 0$:

$$AB \approx \Delta Z(ctg\alpha + ctg\beta), \quad (2.59)$$

$$\frac{\Delta Z}{\Delta P_x} \approx \frac{L}{S(ctg\alpha + ctg\beta)}. \quad (2.60)$$

С учетом того, что $\sigma_{P_x}^{PT} \ll \sigma_{P_x}^{SCT}$ и $\sigma_{P_x}^{Calibr} = \sigma_{P_x}^{PT}$, так как для калибровки триангуляционной системы используется метод фазовой триангуляции, получены выражения для оценки σ_Z^{PT} и σ_Z^{SCT} – среднеквадратичного отклонения измеренной Z -координат участка поверхности адаптивными методами фазовой триангуляции и оптической триангуляции с использованием динамического светового сечения, соответственно:

$$\sigma_Z^{PT} = \sqrt{\sigma_{Zcalibr}^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{\sqrt{2}L\sigma_I}{\pi f \sqrt{N}I(ctg\alpha + ctg\beta)} \right)^2}, \quad (2.61)$$

$$\sigma_Z^{SCT} = \sqrt{\sigma_{Zcalibr}^2 + \left(\frac{L\sigma_I}{\sqrt{2}S(ctg\alpha + ctg\beta)Gr'_{P_x}\Delta} \right)^2}, \quad (2.62)$$

где L – характерный размер диагностируемого объекта, S – разрешение матрицы источника оптического излучения, f – частота фазовой модуляции интенсивности, N – количество фазовых сдвигов, α и β – углы между основанием и оптическими осями фотоприемника и источника оптического излучения, I – диапазон регистрируемых фотоприемником значений интенсивности, σ_I – их среднеквадратичное отклонение, 2Δ – размер области расчета локального градиента, Gr'_{P_x} – первая производная зависимости $Gr(P_x)$ вблизи локального максимума, $\sigma_{Zcalibr}$ – среднеквадратичное отклонение Z -координаты в калибровочных данных.

На основе выражений (2.61) и (2.62) оценим погрешности диагностики трехмерной геометрии объектов разработанными адаптивными методами оптической триангуляции. Пусть $L = 100$ мм, $\beta = 60^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $S = 1280$, $f = 50$, $N = 50$, $I = 255$, $\Delta = 3$, $Gr'_{P_x} = 0.2$. Пусть в случае диагностики непрозрачной поверхности $\sigma_I = \frac{1}{3}$, а в случае светопреломляющей $\sigma_I = 0.765$. Тогда σ_Z^{PT} составляет 5 мкм, что соответствует 0.005 % от характерного размера диагностируемого объекта, а σ_Z^{SCT} составляет 61 мкм, что соответствует на уровне 0.06 % от характерного размера диагностируемого объекта.

Показано, что с использованием разработанных адаптивных методов оптической триангуляции может быть обеспечен прецизионный контроль трехмерной геометрии широкого класса объектов в машиностроении и энергетике. Аналитически установлено, что погрешность контроля

трехмерной геометрии, обусловленная адаптивными методами фазовой триангуляции и оптической триангуляции с использованием динамического светового сечения, составляет на уровне 0.005 % и 0.06 % от характерного размера диагностируемого объекта, соответственно.

2.5. Выводы по главе 2

1) Разработан метод фазовой триангуляции непрозрачных поверхностей в условиях динамичного изменения их светорассеивающих свойств на основе адаптивной компенсации нелинейности приемно-передаточной функции и оптимизации параметров пространственно-временной модуляции интенсивности.

2) Предложен метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения и адаптивной декомпозиции регистрируемого сигнала от аддитивного светового потока.

3) Создан комплекс методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций объектов в машиностроении и энергетике с возможностью адаптации к текстуре диагностируемой поверхности.

4) Аналитически установлено, что погрешность контроля трехмерной геометрии, обусловленная адаптивными методами фазовой триангуляции и оптической триангуляции с использованием динамического светового сечения, составляет на уровне 0.005 % и 0.06 % от характерного размера диагностируемого объекта, соответственно.

Глава 3. Практическая реализация адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике

3.1. Метод калибровки модулей адаптивной триангуляционной системы с регрессионным анализом фазовых распределений

Для адаптивной компенсации геометрических aberrаций оптических элементов приемно-передаточного тракта и нелинейности траекторий лучей при дистанционном контроле трехмерной геометрии объектов на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом разработан метод калибровки отдельных триангуляционных модулей, включающий восстановление в элементах матрицы фотоприемника зависимостей трехмерных координат (X, Y, Z) от координаты P_x матрицы источника излучения (рис. 1.4, а).

В отличие от известных методов калибровки триангуляционных систем с компенсацией нелинейных оптических искажений с помощью введения и учета модели распространения оптических сигналов [29, 32] предложенный подход может быть адаптирован для экспериментальных стендов различной формы без необходимости высокоточного расчета внутренних параметров фотоприемника, координат и ориентации оптических элементов в пространстве и коэффициентов преломления сред.

Предложенный метод калибровки реализован следующим образом. Плоскую калибровочную мишень размещают внутри рабочего участка экспериментального стенда с оптическим доступом. Калибруемый триангуляционный модуль, состоящий из источника оптического излучения и фотоприемника, устанавливают в его рабочее местоположение на экспериментальном стенде. На каждой итерации выполняют:

- 1) измерение разработанным адаптивным методом фазовой триангуляции;
- 2) для каждого элемента (x, y) матрицы фотоприемника сохранение трехмерных координат зарегистрированного участка калибровочной

мишени (X, Y, Z) и восстановленного значения координаты P_x матрицы источника излучения;

- 3) сдвиг калибровочной мишени по направлению нормали к ее поверхности (далее, ось Z) (рис. 3.1).

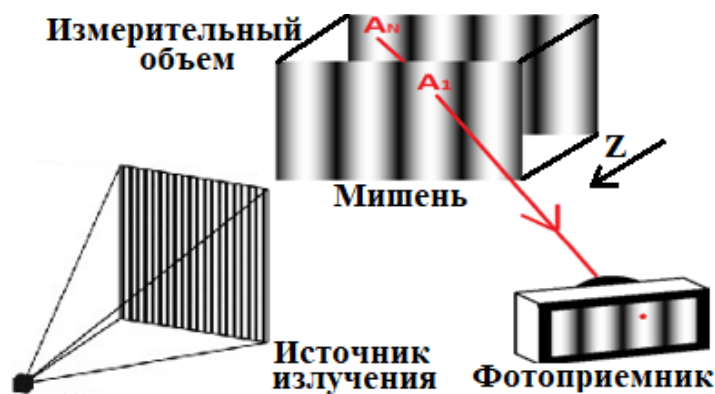


Рис. 3.1. Калибровка триангуляционного модуля на основе параллельных сдвигов плоской мишени и измерений фазовой триангуляцией.

В результате калибровки в каждом элементе (x, y) матрицы фотоприемника восстановлены 3 набора соответствий: $X \leftrightarrow P_x$, $Y \leftrightarrow P_x$ и $Z \leftrightarrow P_x$, формирующих 3 калибровочные зависимости: $X(P_x)$, $Y(P_x)$, $Z(P_x)$ с адаптивной компенсацией геометрических aberrаций оптических элементов приемно-передаточного тракта и нелинейности траекторий лучей (рис. 1.4).

Для применения предложенного метода калибровки необходимо обеспечить возможность восстановления пространственных (X, Y) координат калибровочной мишени в элементах матрицы фотоприемника (x, y) в процессе калибровки. Классическим решением данной задачи является нанесение на поверхность мишени изображения с периодичной структурой [99-103], использование известных (X, Y) координат в ее узлах и их интерполяция на изображение фотоприемника. Для однозначного восстановления (X, Y) координат ключевых точек калибровочной мишени она должна полностью попадать на изображение фотоприемника. Однако данное условие может не выполняться внутри всего калибровочного объема при увеличении угла триангуляции для снижения погрешности

триангуляционных измерений. В данной ситуации на отдельных итерациях калибровки на изображение фотоприемника может попасть лишь внутренняя область мишени, что может привести к ошибке восстановления пространственных координат ключевых точек «классическими» подходами.

Для решения данной проблемы разработано изображение калибровочной мишени с уникальным центральным элементом и в результате однозначно декодируемыми пространственными координатами (X, Y) ключевых точек (рис. 3.2). На их основе и с использованием метода линейной регрессии реализуется восстановление коэффициентов k_i и K_j функции преобразования координат (x, y) изображения фотоприемника в пространственные (X, Y) :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0x + k_1y + k_2xy + k_3x^2 + k_4y^2 \\ K_0x + K_1y + K_2xy + K_3x^2 + K_4y^2 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Для восстановления данного преобразования требуется поиск ключевых точек калибровочной мишени на изображении фотоприемника, сохранение их (x, y) -координат, а также расшифровка (U, V) -координат в периодичной структуре (рис. 3.3), однозначно связанных с пространственными:

$$\begin{pmatrix} X_{3D} \\ Y_{3D} \end{pmatrix} = \left(\frac{U \cdot h_{period}}{2}, \frac{V \cdot v_{period}}{2} \right), \quad (3.2)$$

где v_{period} и h_{period} – физические размеры периода структуры изображения калибровочного паттерна по вертикали и горизонтали, соответственно.

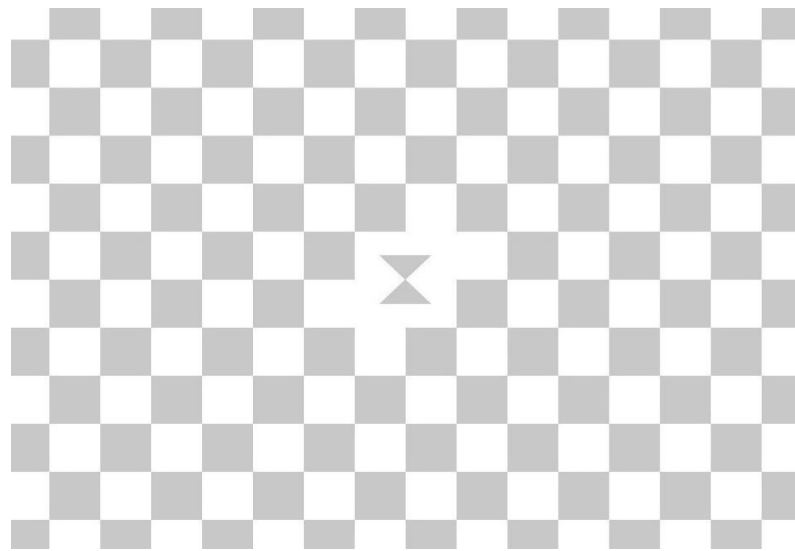


Рис. 3.2. Пример разработанного изображения калибровочной мишени.

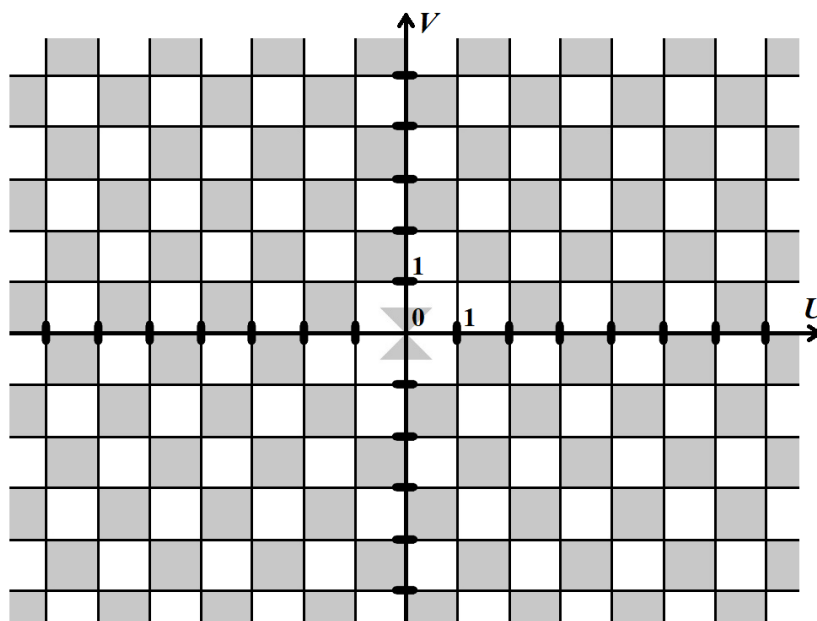
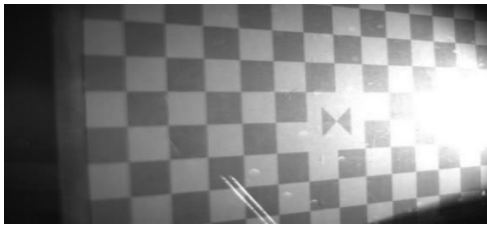
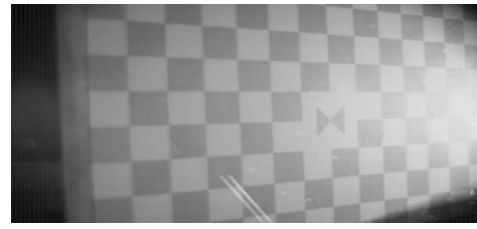


Рис. 3.3. Система (U, V) координат ключевых точек калибровочной мишени.

Необходимость максимальной детализации калибровочных зависимостей и учет ее прямой пропорциональности количеству промежуточных положений калибровочной мишени определяет важность автоматизации поиска ее ключевых точек на изображении фотоприемника. Так как известные алгоритмы поиска ключевых точек на изображении [99-103] требуют строгой периодичности калибровочного шаблона, то их применение для разработанного паттерна (рис. 3.2) может привести к ошибкам и нестабильной работе.



а)



б)

Рис. 3.4. Изображения калибровочной мишени: исходное (а) и обработанное (б).

Для решения данной проблемы разработан метод автоматизированного поиска и восстановления (U, V) координат ключевых точек калибровочной мишени с периодичной структурой и уникальным центральным элементом. Алгоритм его работы включает следующие итерации:

- 1) линейное увеличение источником излучения яркости I^{out} и сохранение N зарегистрированных фотоприемником изображений:

$$I_i^{out} = \frac{255 \cdot (i + 1)}{N}; \quad (3.3)$$

- 2) восстановление изображения калибровочной мишени внутри динамического диапазона (рис. 3.4, б) на основе зарегистрированных в элементах (x, y) матрицы фотоприемника значений интенсивности I_i^{in} :

$$I_{x,y} = \sum_{i=1}^N \log (I_i^{in} + 1); \quad (3.4)$$

- 3) сжатие сгенерированного изображения калибровочной мишени;
- 4) поиск ключевых точек на сжатом изображении;
- 5) восстановление (U, V) координат найденных ключевых точек;
- 6) уточнение координат ключевых точек на изображении калибровочной мишени исходного размера.

Опишем реализацию итераций 4-6 изложенного алгоритма.

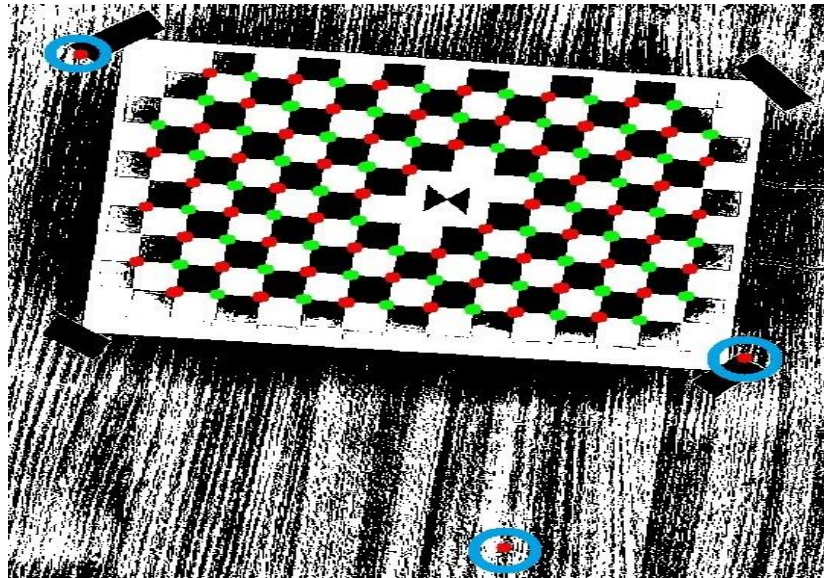


Рис. 3.5. Результат поиска на изображении калибровочной мишени ключевых точек, соответствующих периодичной структуре, до фильтрации.

Разработанный алгоритм поиска ключевых точек на изображении калибровочной мишени включает следующие итерации:

- 1) оценка горизонтального hc и вертикального vc размеров периода структуры калибровочной мишени на изображении фотоприемника;
- 2) бинаризация изображения калибровочной мишени с размером фильтра бинаризации $b_{size} = \max(hc, vc)$:

$$B_{x,y} = \begin{cases} 1, I_{x,y} \geq I_{x,y}^{median} \\ -1, I_{x,y} < I_{x,y}^{median} \end{cases}, \quad (3.5)$$

где (x, y) – координаты на изображении калибровочной мишени, $I_{x,y}^{median}$ – медианное значение $I_{x,y}$ в области фильтрации;

- 3) поиск на изображении калибровочной мишени ключевых точек, соответствующих периодичной структуре (рис. 3.5), удовлетворяющих пороговому критерию результата свертки $B_{x,y}$ с устойчивым к поворотам ядром W^{chess} (рис. 3.6, а) или его инвертированным образом (рис. 3.6, б) с размером $2h + 1 = \frac{\min(hc, vc)}{2}$:

$$\sum_{\Delta x=-h}^h \sum_{\Delta y=-h}^h W_{\Delta x, \Delta y}^{chess} B_{x+\Delta x, y+\Delta y} > T^{chess}, \quad (3.6)$$

где T^{chess} – установленное пороговое значение;

- 4) сохранение в набор All_KP координат (x, y) найденных ключевых точек и показателя инвертированности $Inv \in \{-1, 1\}$, определяющегося совпадением области ключевой точки с ядром (рис. 3.6, а) или его инвертированным образом (рис. 3.6, б);
- 5) итерация по набору All_KP , на основе hc и vc оценка (x, y) координат и показателя инвертированности Inv соседних точек по отношению к текущей, поиск соответствий из набора All_KP и в случае их отсутствия исключение текущей точки из набора;
- б) поиск координат (x_c, y_c) центрального элемента калибровочной мишени, соответствующего максимуму результата свертки $B_{x,y}$ с устойчивым к поворотам ядром W^{center} (рис. 3.6, в) или его инвертированным образом (рис. 3.6, г) с размером $2h + 1 = \frac{\min(hc, vc)}{4}$:

$$(x_c, y_c) = \underset{x, y}{argmax} \sum_{\Delta x=-h}^h \sum_{\Delta y=-h}^h W_{\Delta x, \Delta y}^{center} B_{x+\Delta x, y+\Delta y}. \quad (3.7)$$

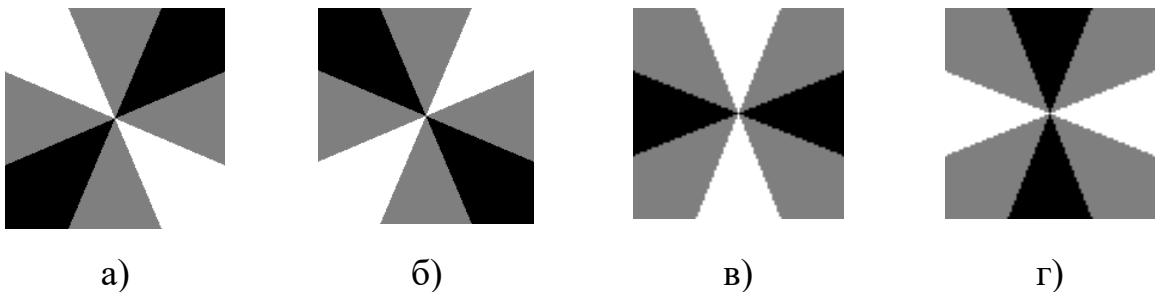


Рис. 3.6. Ядра для поиска узлов периодичной структуры калибровочной мишени (а, б) и центрального элемента (в, г). Белый, серый и черный цвета соответствуют значениям в ядре: 1, 0, -1, соответственно.

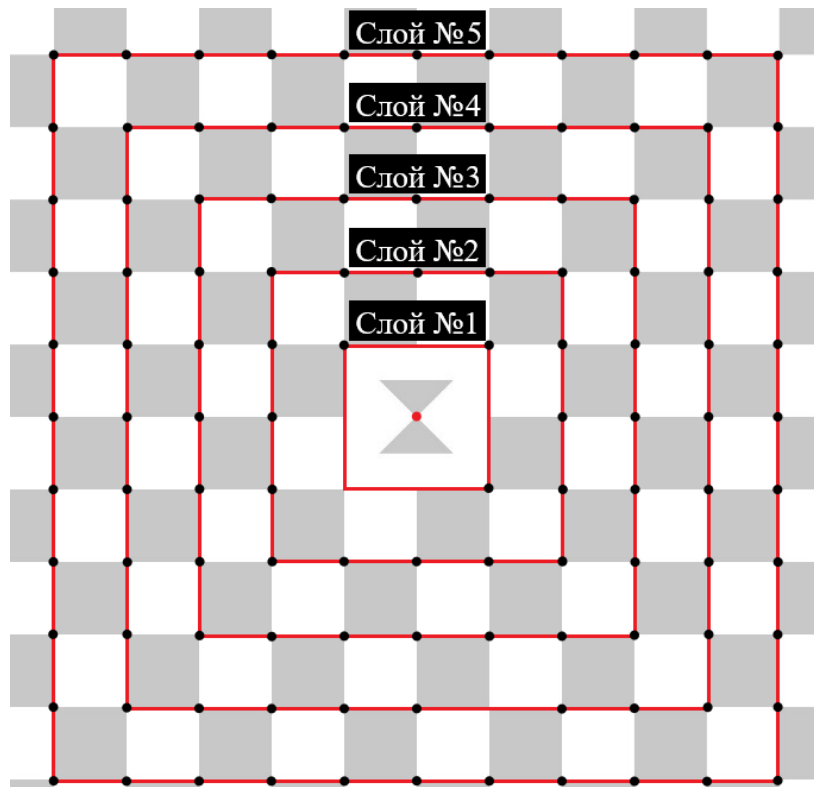


Рис. 3.7. Слои ключевых точек калибровочной мишени.

Оценка горизонтального hc и вертикального vc размеров периода структуры калибровочной мишени на его изображении реализована на основе медианных значений расстояний между соседними ключевыми точками в наборе, полученном с помощью вышеописанных подходов и фиксированных значений $W^{chess} = 7$ и b_{size} :

$$b_{size} = \operatorname{argmax}_{b=3,5,7\dots} \operatorname{len}(All_KP(B(b))), \quad (3.8)$$

где len – функция расчета количества ключевых точек в наборе, $B(b)$ – результат бинаризации изображения с размером фильтра b .

Восстановление (U, V) координат ключевых точек из набора All_KP реализовано последовательно и послойно по отношению к центральному элементу (рис. 3.7). На i -ой итерации работы алгоритма реализуется поиск ключевых точек из набора All_KP , соответствующих слою № i :

- 1) итерирование по (U, V) координатам слоя № i ;

- 2) экстраполяция (x^*, y^*) координат ключевой точки на основе текущих (U, V) координат и функции F :

$$F \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_0U + c_1V + c_2UV + c_3U^2 + c_4V^2 \\ C_0U + C_1V + C_2UV + C_3U^2 + C_4V^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix}; \quad (3.9)$$

- 3) поиск ключевой точки из набора All_KP такой, что ее показатель инвертированности Inv соответствует текущему (U, V) элементу калибровочной мишени, а координаты (x, y) удовлетворяют условиям:

$$-du \leq x - x^* \leq du, \quad (3.10)$$

$$-dv \leq y - y^* \leq dv, \quad (3.11)$$

$$(x, y) = \underset{(x_i, y_i) \in All_KP}{\operatorname{argmin}} ((x_i - x^*)^2 + (y_i - y^*)^2), \quad (3.12)$$

где du и dv – установленные пороговые значения;

- 4) в случае нахождения ключевой точки из набора All_KP для элемента (U, V) добавление в итоговый набор KP ее (x, y) и (U, V) координат и ее удаление из набора All_KP ;
- 5) обновление коэффициентов c_i и C_i функции F на основе координат точек из набора KP и метода линейной регрессии.

После завершения поиска ключевых точек калибровочной мишени реализовано домножение их (x, y) координат на коэффициент сжатия изображения dec для соответствия исходному размеру. После этого реализовано уточнение координат (x, y) найденных ключевых точек на основе анализа в заданной окрестности $\pm 2dec$ результатов свертки (рис. 3.8) изображения калибровочной мишени с ядром (рис. 3.6) и поиска элемента с ее максимальным значением. Аппроксимируя квадратичной функцией

значения результатов свертки вдоль горизонтального и вертикального пиксельных срезов, проходящих через координаты найденного элемента, уточняется положение ключевой точки, соответствующее вершине аппроксимирующей функции (рис. 3.8, б).

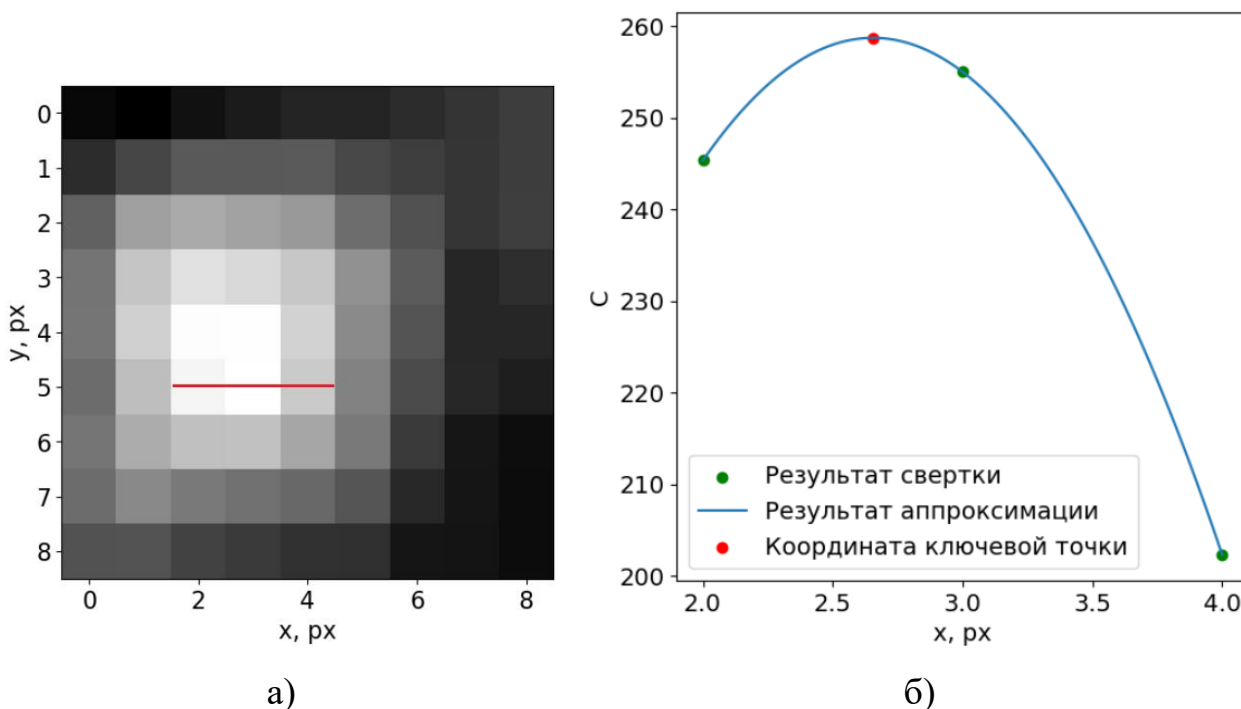


Рис. 3.8. Аппроксимация квадратичной функцией результата свертки изображения с ядром (б) вдоль горизонтального пиксельного среза (а).

В результате разработан метод калибровки отдельных модулей адаптивной системы триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов на основе параллельных сдвигов плоской мишени внутри целевого измерительного объема и ее диагностики фазовой триангуляцией. С помощью регрессионного анализа фазовых распределений обеспечена возможность восстановления в элементах матрицы фотоприемника калибровочных зависимостей трехмерных координат (X, Y, Z) от координаты P_x матрицы источника излучения с адаптивной компенсации геометрических aberrаций оптических элементов приемно-передаточного тракта и нелинейности траекторий лучей. Обработка промежуточных калибровочных данных полностью автоматизирована.

3.2. Метод взаимной калибровки модулей адаптивной триангуляционной системы с дифференциальным анализом фазовых распределений

Для проведения передовых научных исследований процессов трехмерных деформаций объектов в машиностроении и энергетике требуется применение системы из нескольких триангуляционных модулей с различными размерами измерительного объема для одновременного контроля трехмерной геометрии как всей регистрируемой поверхности, так и отдельных участков с повышенным пространственным разрешением. Проблема применения данной системы на экспериментальных стендах закрытого типа с оптическим доступом связана с необходимостью ее калибровки для компенсации нелинейности траекторий оптических лучей, геометрических аберраций оптических элементов приемно-передаточного тракта и согласования результатов трехмерных измерений отдельных моделей. Несмотря на наличие множества известных методов калибровки [86-93], их затруднительно адаптировать для многомодульной системы триангуляционного контроля трехмерной геометрии объектов в условиях нелинейных оптических искажений.

Для решения данной проблемы в рамках диссертационной работы предложен и реализован двухэтапный метод калибровки многомодульной адаптивной триангуляционной системы на основе фазовой триангуляции. Первый этап его работы включает калибровку отдельных модулей адаптивной триангуляционной системы с помощью метода, основанного на регрессионном анализе фазовых распределений, реализация которого подробно описана в Разделе 3.1. Второй этап его работы включает взаимную калибровку пар триангуляционных модулей M_l и M_k с адаптированными оптическими схемами и измерительными объемами, пересекающимися в пространстве, результатом которой являются восстановленные матрица поворота R и вектор трансляции T между их декартовыми системами

координат, что обеспечивает возможность согласования результатов трехмерных измерений.

Опишем разработанный алгоритм поиска R и T . На первом шаге модулями M_l и M_k выполняются измерения трехмерной геометрии объекта, размещенного в измерительном объеме адаптивной триангуляционной системы. На втором шаге восстанавливается набор, элементом которого является соответствие $p'_i \leftrightarrow p_i$ между трехмерными координатами в декартовых системах модулей M_l и M_k . На его основе реализуется восстановление матрицы поворота R и вектора трансляции T :

$$p'_i = Rp_i + T + N_i, \quad (3.13)$$

где N_i – вектор шума 3×1 . Решается задача минимизации Σ^2 :

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|p'_i - (Rp_i + T)\|^2. \quad (3.14)$$

$$\Sigma^2 = \sum_{i=1}^N \|q'_i - Rq_i\|^2, \quad (3.15)$$

$$q'_i = p'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p'_i, \quad (3.16)$$

$$q_i = p_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, \quad (3.17)$$

Поиск R , минимизирующей Σ^2 , основан на известном методе сингулярного разложения SVD [104, 105]:

$$H = \sum_{i=1}^N q_i q_i'^t, \quad (3.18)$$

$$H = U \Lambda V^t, \quad (3.19)$$

$$R = V U^t, \quad (3.20)$$

где $[U, \Lambda, V] = SVD(H)$, t – операция транспонирования. После поиска матрицы поворота R восстанавливается вектор трансляции T :

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i' - R \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \right). \quad (3.21)$$

Для поиска соответствий $p_i' \leftrightarrow p_i$ между трехмерными координатами в декартовых системах модулей M_l и M_k источник оптического излучения последовательно формирует фазовые изображения с горизонтальной и вертикальной модуляциями интенсивности, а фотоприемники регистрируют результаты их рассеяния поверхностью объекта (рис. 3.9):

$$I_h^{out}(P_X, P_Y) = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi f_X P_X}{S_X}\right), \quad (3.22)$$

$$I_v^{out}(P_X, P_Y) = a_0 + a_1 \sin\left(\frac{2\pi f_Y P_Y}{S_Y}\right), \quad (3.23)$$

где (P_X, P_Y) – координаты на формируемом изображении, a_0 – средняя яркость, a_1 – амплитуда, $f_{X,Y}$ – частоты фазовой модуляции интенсивности по горизонтали и вертикали, $S_{X,Y}$ – горизонтальное и вертикальное разрешения источника излучения.

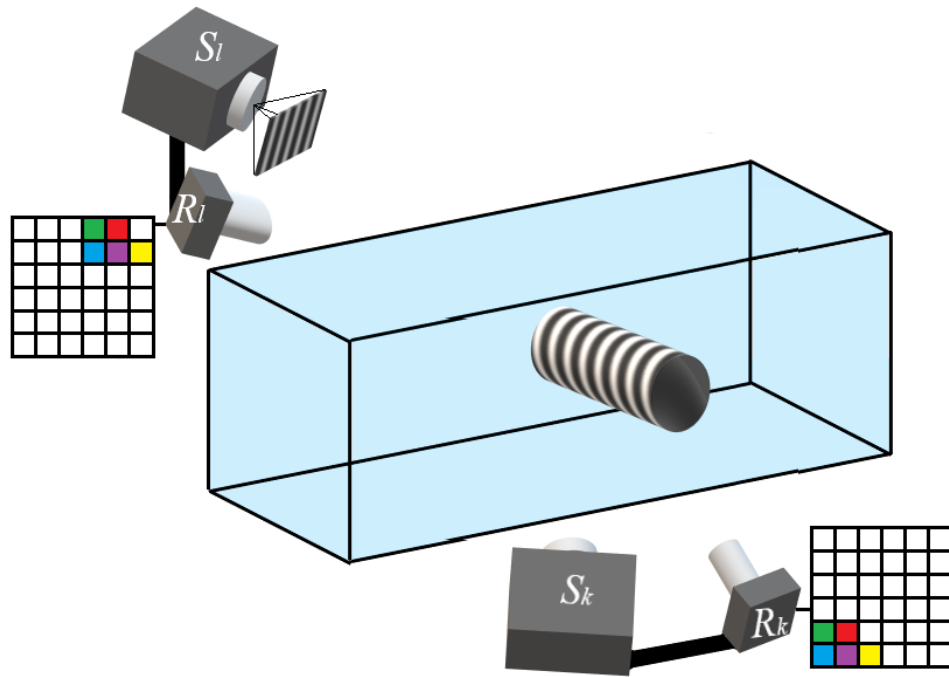


Рис. 3.9. Дифференциальный анализ фазовых распределений триангуляционных модулей $M_{l,k}$, состоящих из источника S и приемника R оптического излучения. Цветами обозначены разные значения фазы.

На основе дифференциального анализа восстановленных фазовых распределений реализован поиск элементов (x_l, y_l) и (x_k, y_k) матриц фотоприемников модулей M_l и M_k , контролирующих один и тот же участок поверхности:

$$\sum_{o \in \{v, h\}} (PG_l^o - PG_k^o)^2 < eps, \quad (3.24)$$

где eps – пороговое значение, (PG_l^v, PG_l^h) и (PG_k^v, PG_k^h) – восстановленные значения фазы при вертикальной и горизонтальной модуляциях интенсивности в элементах (x_l, y_l) и (x_k, y_k) матриц фотоприемников модулей M_l и M_k , соответственно. В результате сохраняется соответствие $p'_i \leftrightarrow p_i$ между трехмерными координатами, восстановленными в данных элементах матриц фотоприемников в процессе измерений трехмерной геометрии диагностируемого объекта.

В результате разработан метод взаимной калибровки модулей адаптивной триангуляционной системы контроля трехмерной геометрии объектов на основе дифференциального анализа фазовых распределений. Обеспечена возможность применения в условиях нелинейных оптических искажений триангуляционной системы, состоящей из нескольких модулей, для одновременного контроля трехмерной геометрии как всей регистрируемой поверхности, так и отдельных участков с адаптивным пространственным разрешением.

3.3. Аппаратная реализация адаптивных триангуляционных систем

Для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов на аэродинамических, климатических и силовых экспериментальных стендах в задачах машиностроения и энергетики разработаны адаптивные триангуляционные системы, реализующие предложенные методы трехмерной диагностики. Устойчивость и эффективность разработанных методов адаптивной оптической триангуляции позволили выполнить их реализацию на серийной оптико-электронной элементной базе.

Разработана адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля трехмерной геометрии различных видов наледи, формирующейся на поверхности исследуемого объекта, изолированного в рабочем участке климатического экспериментального стенда с оптическим доступом (рис. 3.10). Оборудованный климатический стенд расположен в институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, нацелен на поиск эффективных методов борьбы с обледенением объектов энергетики, представлен в виде холодильной установки и расположенного в ней объекта, подключенного к криотермостату. В состав разработанной адаптивной триангуляционной системы включены два измерительных модуля для обеспечения возможности

диагностики процессов обледенения как всей исследуемой поверхности, так и локального участка с адаптивным пространственным разрешением.

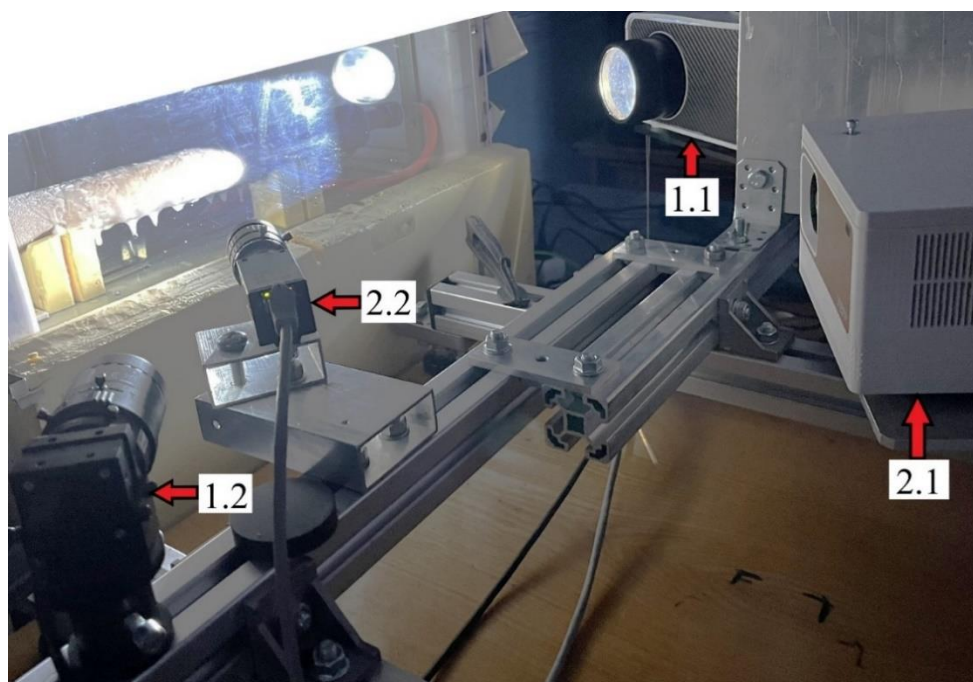
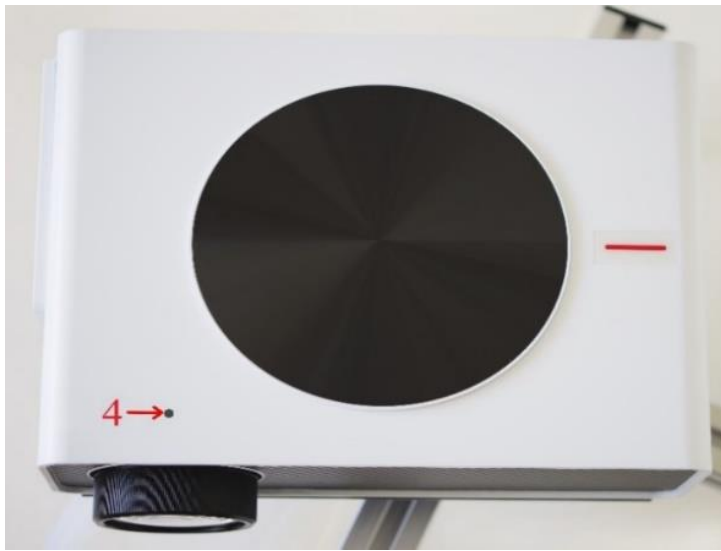
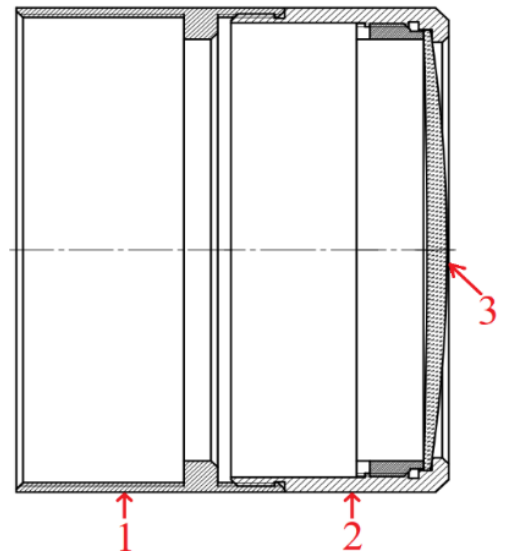


Рис. 3.10. Адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля трехмерной геометрии наледи на климатическом стенде ИТ СО РАН для исследований процессов обледенения объектов энергетики. 1.1, 1.2 и 2.1, 2.2 – источник излучения и фотоприемник в составе триангуляционных измерительных модулей.

В качестве источников освещения использованы цифровые проекторы YUYU Q11 и TouYinGer Q9 с разрешениями (1024 x 600) и (1920 x 1080) и световыми потоками 1100 лм и 7000 лм, соответственно. В оптическую систему цифрового проектора TouYinGer Q9 добавлен съемный объектив с установленной линзой +2 дптр (рис. 3.11, б). В результате область XYZ резкого изображения составила порядка (200 x 110 x 60) мм. В качестве фотоприемников использованы промышленные видеокамеры The Imaging Source: DMK 72BUC02 и DMK 33GX264 с установленными 5 Мп объективами (рис. 3.12, б, в). Разрешение фотоприемников программно установлено (1224 x 1024), что соответствует пространственным разрешениям измерительных модулей на уровне 108 и 32 мкм.

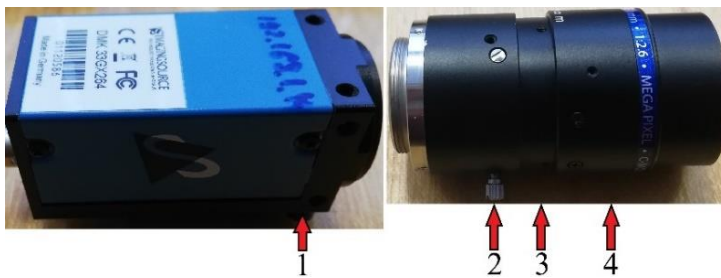


а)

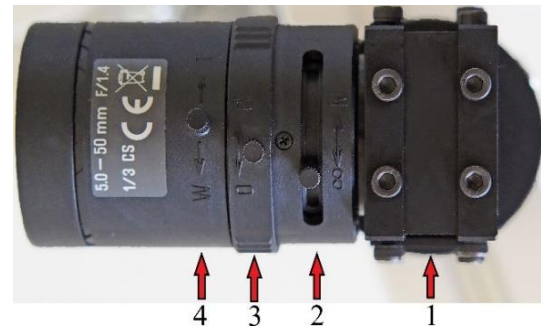


б)

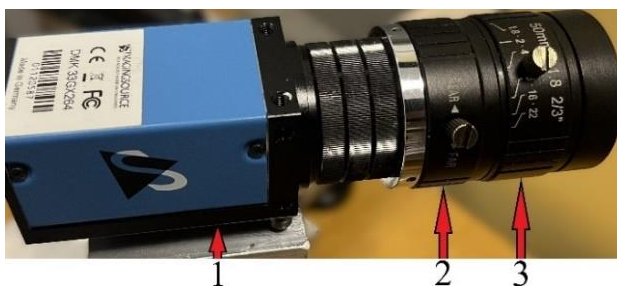
Рис. 3.11. Внешний вид цифровых проекторов TouYinGer Q9 и Q10 (а) с доработанной оптической системой (б). 1 – участок исходного объектива, 2 – разработанный съемный объектив, 3 – линза, 4 – фиксирующий винт.



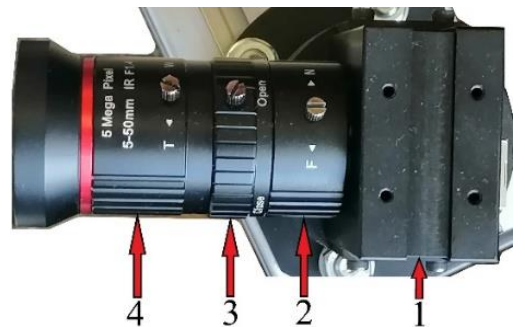
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.12. Фотоприемники The Imaging Source в составе адаптивных триангуляционных систем: DMK 33GX264 (а, в), DMK 72BUC02 (б) и DMM 25GP031-ML (г). 1 – блок регистрации и передачи изображений, 2 – настройка резкости, 3 – диафрагма, 4 – трансфокатор.



Рис. 3.13. Адаптивная триангуляционная система для контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде.

Разработана адаптивная триангуляционная система для контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде (рис. 3.13). В ее состав включены два измерительных модуля для обеспечения возможности диагностики поля трехмерных деформаций как всей исследуемой поверхности, так и локального участка с адаптивным пространственным разрешением. В качестве источников освещения использованы цифровые проекторы TouYinGer Q10 с разрешением (1920 x 1080) и световым потоком 9500 лм. В результате доработки их оптических систем обеспечена возможность гибкой

настройки размера области XYZ резкого изображения триангуляционных модулей в диапазонах от (800 x 450 x 400) до (1600 x 850 x 2000) мм и от (200 x 110 x 60) до (240 x 140 x 70) мм, соответственно. В качестве фотоприемников использованы промышленные видеокамеры The Imaging Source DMM 25GP031-ML с установленными 5 Мп объективами и разрешением до (2592 x 1944) (рис. 3.12, г).



Рис. 3.14. Адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля параметров массообмена на аэродинамическом стенде ИТ СО РАН.

Разработана адаптивная триангуляционная система (рис. 3.14) контроля трехмерной геометрии поверхности в процессе сублимации на аэродинамическом стенде закрытого типа в институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН (рис. 3.15) для расчета локальных коэффициентов массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок. В качестве источника освещения использован цифровой проектор TouYinGer Q9 с разрешением (1920 x 1080) и световым потоком 7000 лм. В его оптическую систему добавлен съемный объектив с установленной линзой +2 дптр (рис. 3.11, б). В результате область

XYZ резкого изображения составила порядка (200 x 110 x 60) мм. В качестве фотоприемника использована промышленная видеокамера The Imaging Source DMK 72BUC02 с установленным 5 Мп объективом (рис. 3.12, б). Разрешение фотоприемника программно установлено (216 x 162), что соответствует пространственному разрешению на уровне 1 мм.

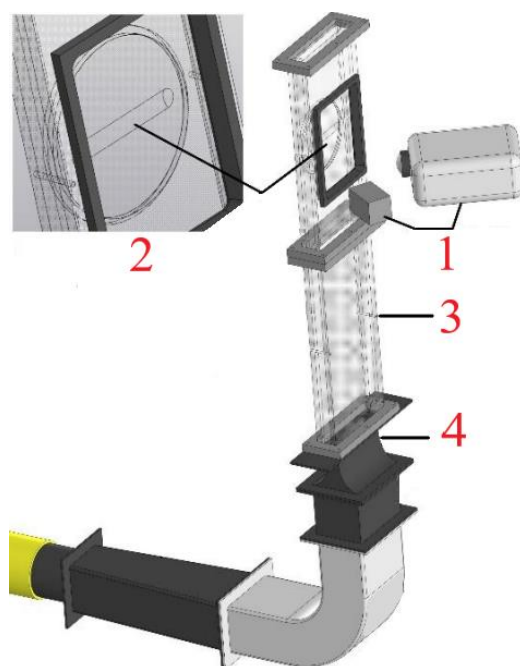


Рис. 3.15. Схема рабочего участка аэродинамического стенда ИТ СО РАН для исследований процессов массообмена. 1 – фотоприемник и источник излучения адаптивной триангуляционной системы, 2 – исследуемый объект, 3 – аэродинамический канал с внутренним поперечным сечением (20 x 150) мм и длиной 800 мм, 4 – сопло Витошинского.

Разработана адаптивная триангуляционная система (рис. 3.16) для прецизионного контроля трехмерной геометрии наледи типа «иней» и «изморозь», формирующейся на поверхности исследуемого объекта, изолированного в рабочем участке аэродинамического экспериментального стенда с оптическим доступом (рис. 3.17). Оборудованный аэродинамический стенд расположен в институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, нацелен на поиск эффективных методов борьбы с обледенением ветрогенераторов, представлен в виде канала с поперечным сечением (200 x 200) мм и толщиной оптически прозрачных стенок 20 мм. В качестве

источника освещения использован цифровой проектор Excelvan CL720 с разрешением (1280 x 800), световым потоком 3000 лм и доработанной оптической системой для формирования резкого изображения на расстоянии 600-800 мм. В качестве фотоприемника использована промышленная видеокамера The Imaging Source DMK 33GX264 с установленным 5 Мп объективом (рис. 3.12, а). Разрешение фотоприемника программно установлено (204 x 170), что соответствует пространственному разрешению на уровне 1.5 мм.

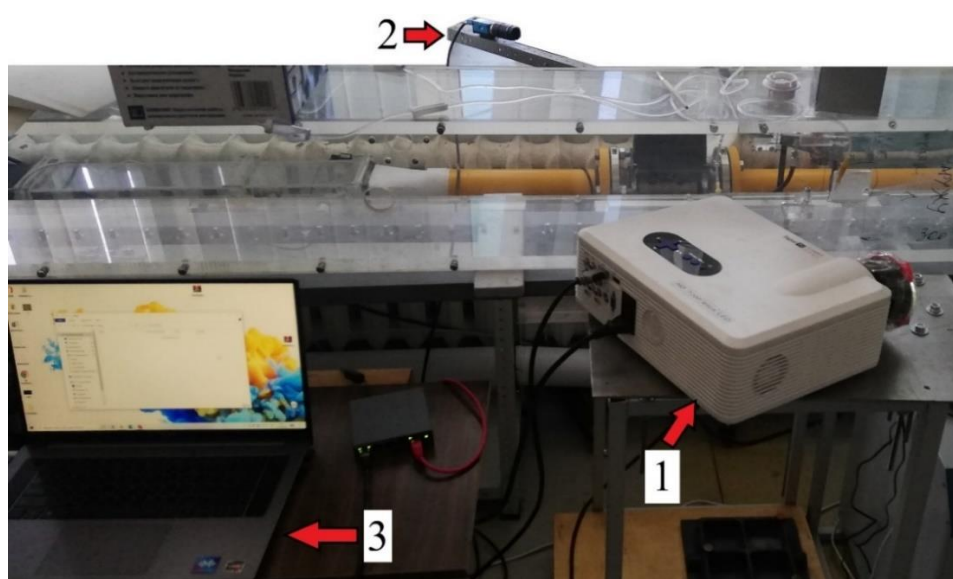


Рис. 3.16. Адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля трехмерной геометрии наледи на аэродинамическом стенде ИТ СО РАН для исследований процессов обледенения ветрогенераторов.

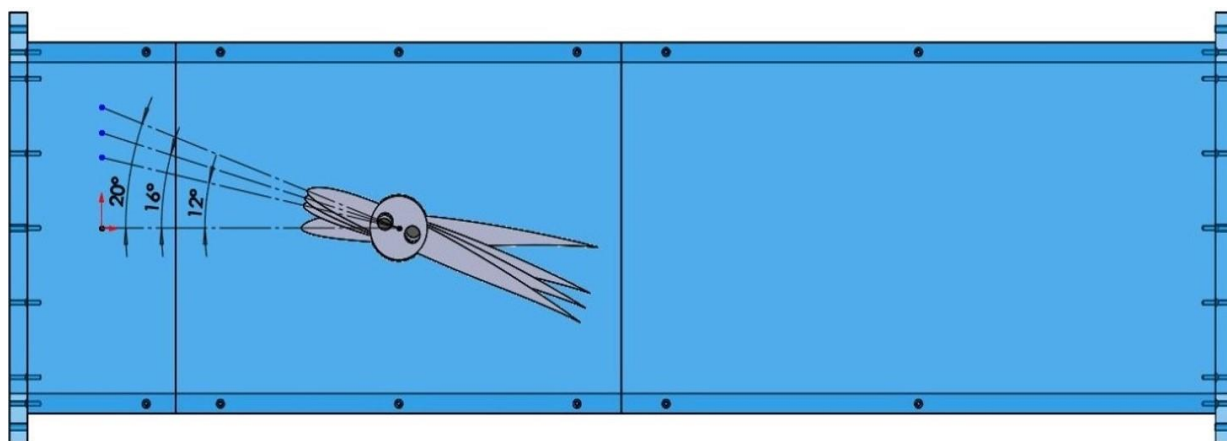


Рис. 3.17. Модель рабочего участка аэродинамического стенда ИТ СО РАН для исследований процессов обледенения ветрогенераторов.

Обеспечена возможность модернизации разработанных адаптивных триангуляционных систем для научно-технических задач длительной диагностики трехмерной геометрии исследуемых объектов. Для этого в качестве источника излучения необходимо использовать разработанную термостатированную модификацию цифрового проектора TouYinGer Q10 (рис. 3.18, 3.19). Для исключения линейных и угловых деформаций, обусловленных температурным расширением и механическими нагрузками, выполнен монтаж оптико-электронных элементов цифрового проектора TouYinGer Q10 на металлическое основание 12 Д16Т и добавлена подсистема терморегуляции (рис. 3.20). Принцип ее работы основан на поддержании рабочей температуры 40 °С монтажного основания с помощью интегрированного нагревательного элемента. Выбранное рабочее значение температуры обеспечивает работоспособность системы терморегуляции в широком диапазоне условий эксплуатации: от комнатной температуры окружающей среды до более низких значений.



Рис. 3.18. Термостатированный цифровой проектор TouYinGer Q10 с доработанной оптической системой.

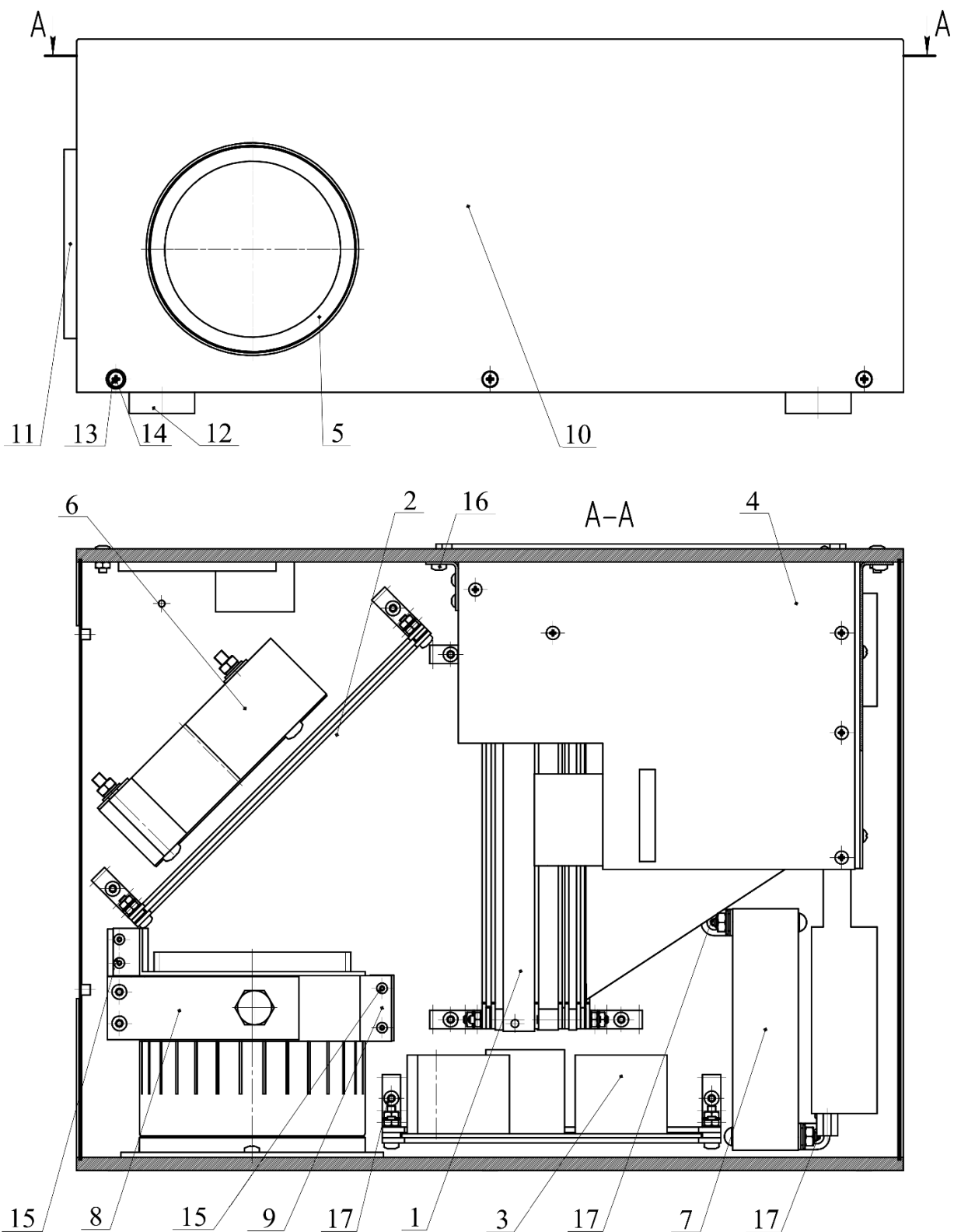


Рис. 3.19. Сборочный чертеж термостатированного цифрового проектора TouYinGer Q10 с доработанной оптической системой: вид спереди. 1 – ЖК дисплей, 2 – зеркало, 3 – блок питания, 4 – материнская плата, 5 – объектив, 6, 7 – система охлаждения, 8, 9 – опоры объектива, 10 – передняя стенка, 11 – фильтр, 12 – ножка, 13-17 – стандартные крепежные элементы.

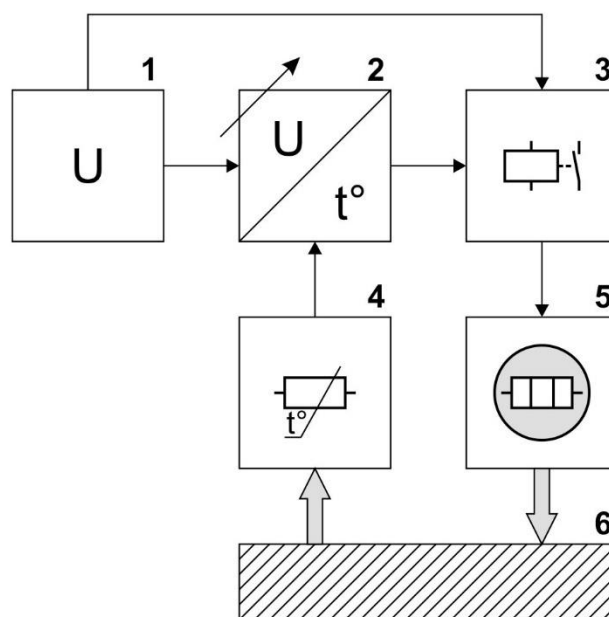


Рис. 3.20. Функциональная схема системы терморегуляции цифрового проектора TouYinGer Q10 с доработанной оптической системой: 1 – блок питания, 2 – терморегулятор программируемый, 3 – реле силовое, 4 – датчик температуры, 5 – элемент нагревательный, 6 – основание монтажное.

Для калибровки адаптивных триангуляционных систем прецизионного контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде разработан узел калибровки (рис. 3.21), обеспечивающий возможность ручного перемещения калибровочной мишени с размерами $(XY) = (1800 \times 1200)$ мм вдоль оси Z в диапазоне 2000 мм.

Для калибровки адаптивных триангуляционных систем прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов на аэродинамических и климатических экспериментальных стендах разработан узел калибровки (рис. 3.22), обеспечивающий возможность перемещения вдоль оси Z в диапазоне 130 мм калибровочной мишени с размерами $(XY) = (190 \times 115)$ мм. Перемещение калибровочной мишени на 1 мм вдоль оси Z реализуется с помощью поворота винтового механизма на 360° .



Рис. 3.21. Узел калибровки адаптивных триангуляционных систем для контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде.



Рис. 3.22. Узел калибровки адаптивных триангуляционных систем прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов на аэродинамических и климатических экспериментальных стендах.

В результате реализована аппаратная часть адаптивных триангуляционных систем для прецизионного контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде, геометрических параметров различных видов наледи на климатическом и аэродинамическом стендах и трехмерной геометрии поверхности в процессе сублимации на аэродинамическом стенде для расчета локальных коэффициентов массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок

3.4. Программное обеспечение адаптивных триангуляционных систем

Устойчивое функционирование адаптивных триангуляционных систем организовано с помощью разработки его программного обеспечения. При его проектировании учтены необходимости реализации интерфейсов управления фотоприемником и источником оптического излучения и обеспечения возможностей: подготовки измерительного комплекса к проведению измерений, сбора и обработки промежуточных измерительных данных, анализа результатов измерений трехмерной геометрии диагностируемого объекта и расчета его деформаций.

Требуемое программное обеспечение разработано на языках программирования C# и Python и представлено в виде приложения, работа в котором организована поэтапно:

- 1) калибровка отдельных триангуляционных модулей (рис. 3.23);
- 2) взаимная калибровка триангуляционных модулей (рис. 3.24);
- 3) адаптивная настройка экспозиции фотоприемников (рис. 3.25);
- 4) измерения трехмерной геометрии диагностируемого объекта (рис. 3.26);
- 5) анализ результатов измерений трехмерной геометрии и деформаций диагностируемого объекта (рис. 3.27).

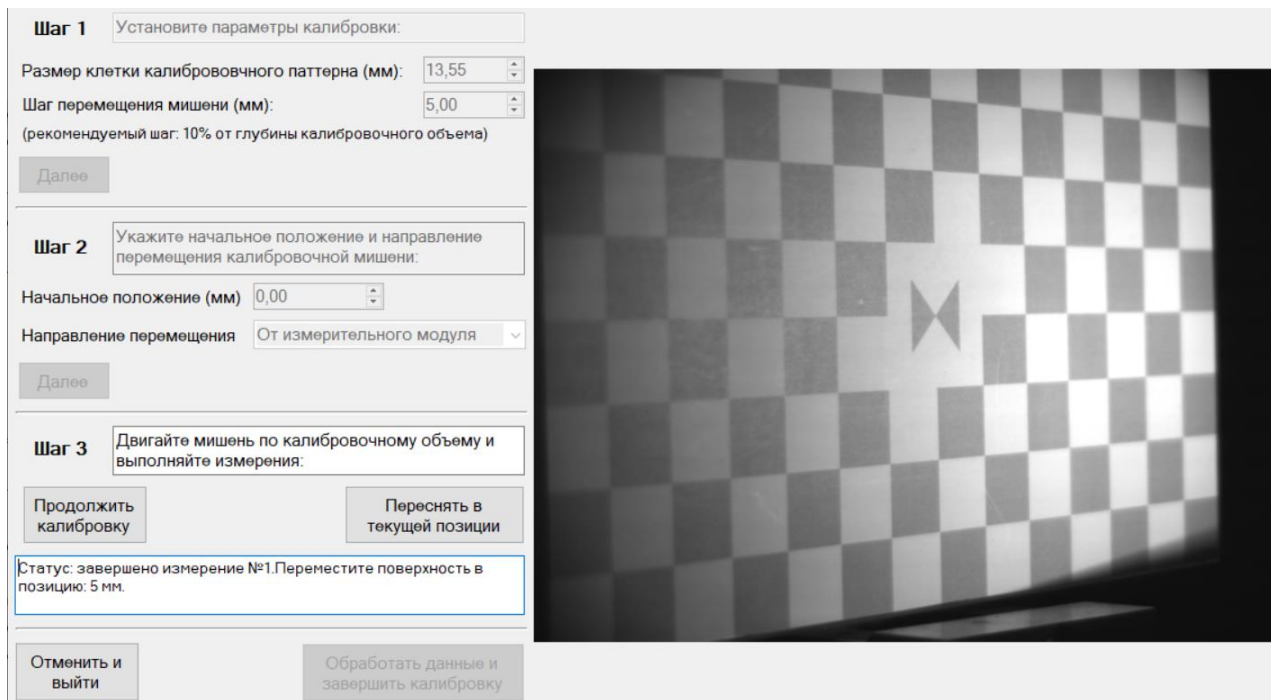


Рис. 3.23. Интерфейс калибровки триангуляционного измерительного модуля.

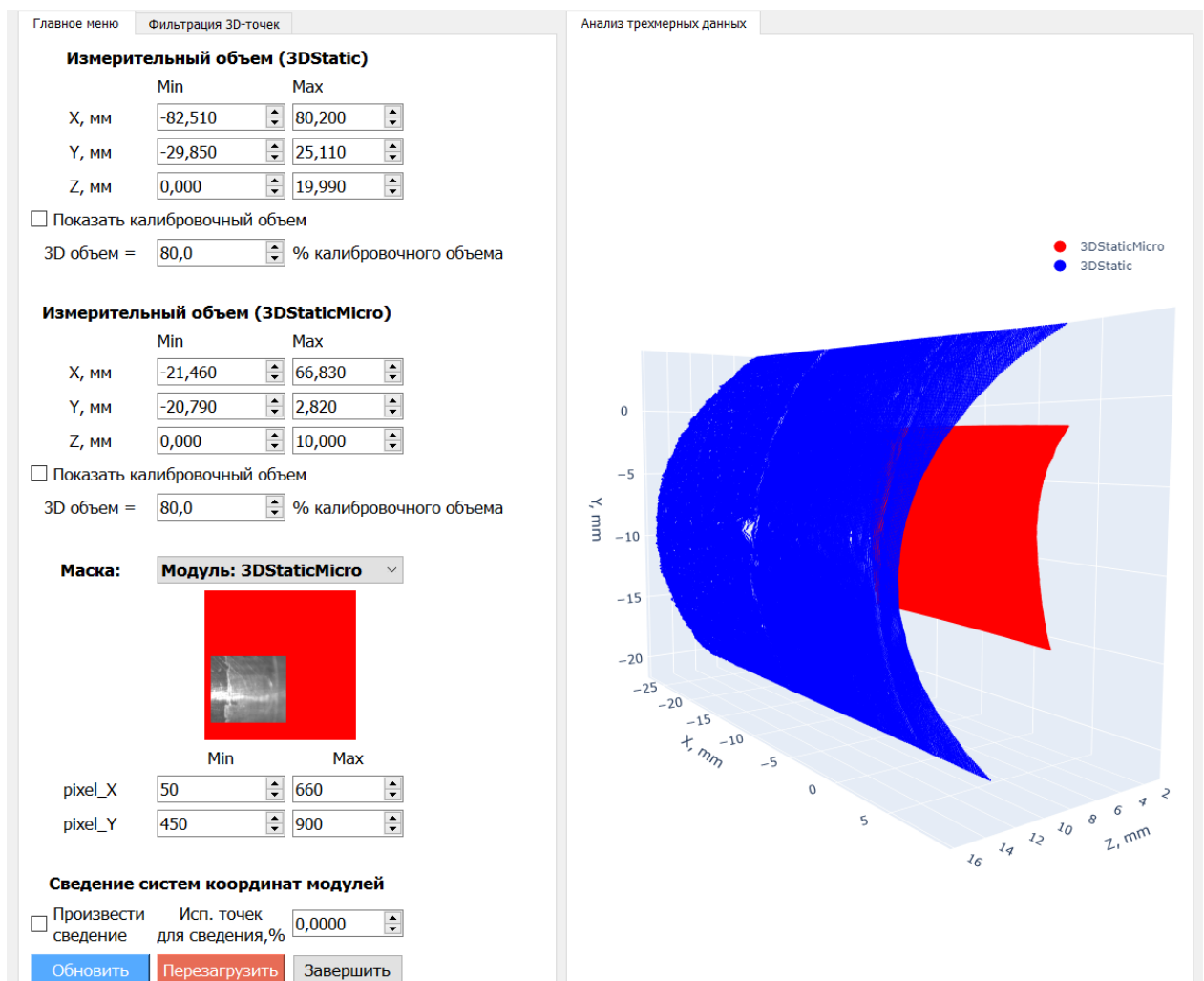


Рис. 3.24. Интерфейс взаимной калибровки триангуляционных модулей.

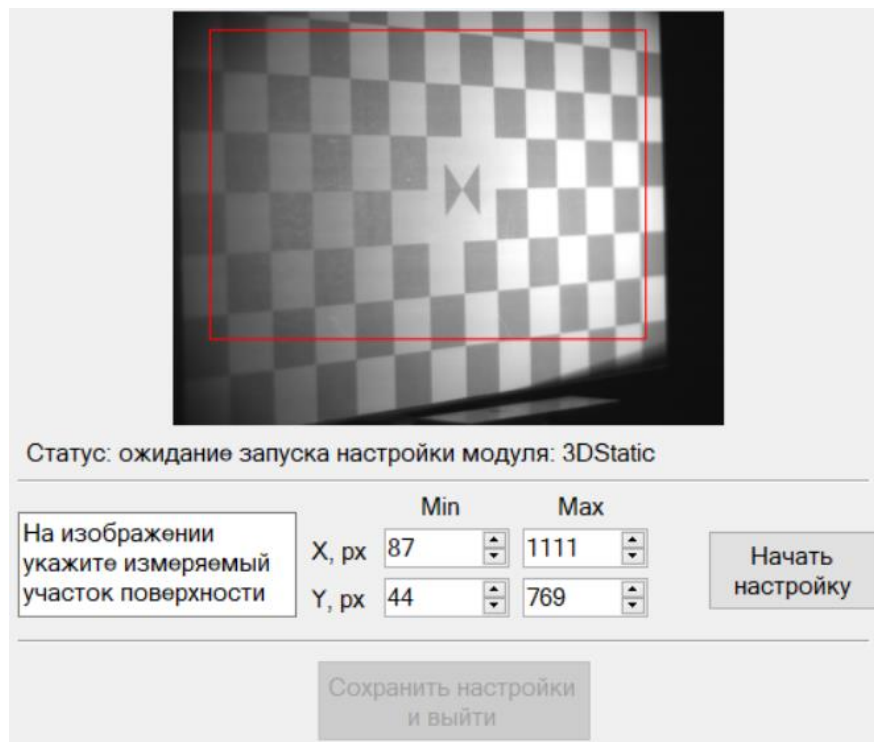


Рис. 3.25. Интерфейс адаптивной настройки экспозиции фотоприемника.

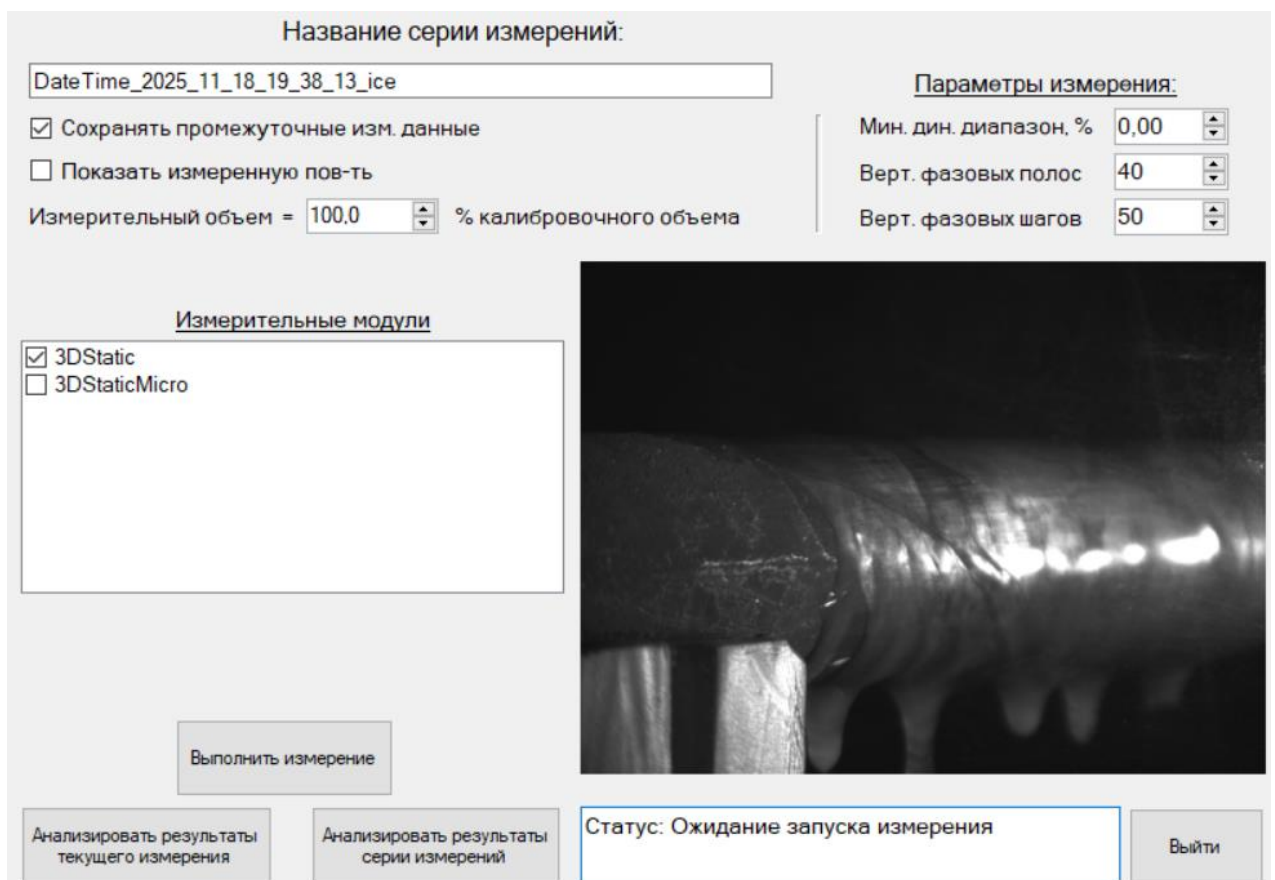


Рис. 3.26. Интерфейс измерений трехмерной геометрии объекта.

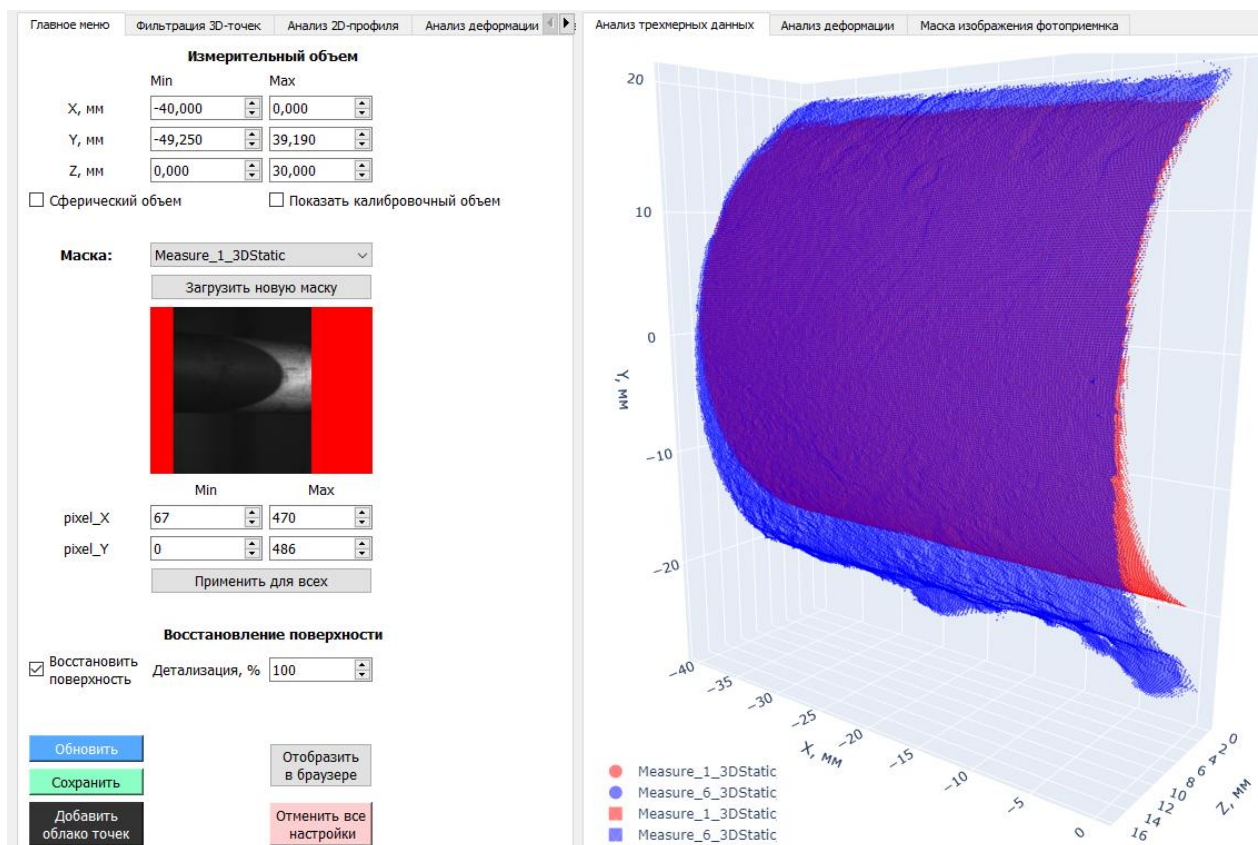


Рис. 3.27. Интерфейс анализа результатов измерений трехмерной геометрии объекта.

Процессы измерений разработанными адаптивными методами фазовой триангуляции и оптической триангуляции с использованием динамического светового сечения организованы в виде машины состояний (рис. 3.28):

- STAT_WAIT_MSR_START – ожидание запуска измерений;
- STAT_GRAB_CAM_IMG – формирование источником излучения белой засветки и сохранение регистрируемого фотоприемником изображения;
- STAT_GRAB_GRADIENT – формирование источником излучения засветок с линейным увеличением яркости и сохранение регистрируемых фотоприемником изображений;
- STAT_GRAB_VER_GREY и STAT_GRAB_HOR_GREY – формирование источником излучения вертикально и горизонтально ориентированных двоично-кодированных структурированных изображений, реализующих коды Грея и сохранение регистрируемых фотоприемником изображений;

- STAT_GRAB_VER_SIN и STAT_GRAB_HOR_SIN – формирование источником излучения вертикально и горизонтально ориентированных структурированных изображений с гармоническим распределением интенсивности и сохранение регистрируемых фотоприемником изображений;
- STAT_GRAB_WB_BORDER – формирование источником излучения структурированных изображений в виде белого и черного прямоугольников и заданной координатой границы между ними и сохранение регистрируемых фотоприемником изображений;
- STAT_PROC_GRADIENT – обработка изображений, зарегистрированных при формировании засветок с линейным увеличением яркости, и сохранение изображения объекта внутри динамического диапазона фотоприемника;
- STAT_PROC_VER_PG и STAT_PROC_HOR_PG – обработка изображений, зарегистрированных при формировании вертикально и горизонтально ориентированных структурированных изображений с гармоническим распределением интенсивности и реализующих коды Грея, и сохранение восстановленного фазового распределения с расширенным динамическим диапазоном;
- STAT_PROC_WB_BORDER – обработка изображений, зарегистрированных при формировании структурированных изображений в виде белого и черного прямоугольников и заданной координатой границы между ними, и сохранение соответствий между координатами (x, y) матрицы фотоприемника и P_x матрицы источника излучения;
- STAT_CALC_POINTS – восстановление и сохранение трехмерных координат (X, Y, Z) участков поверхности объекта, регистрируемых элементами (x, y) матрицы фотоприемника;
- STAT_MSR_FINISHED – измерение трехмерной геометрии завершено.

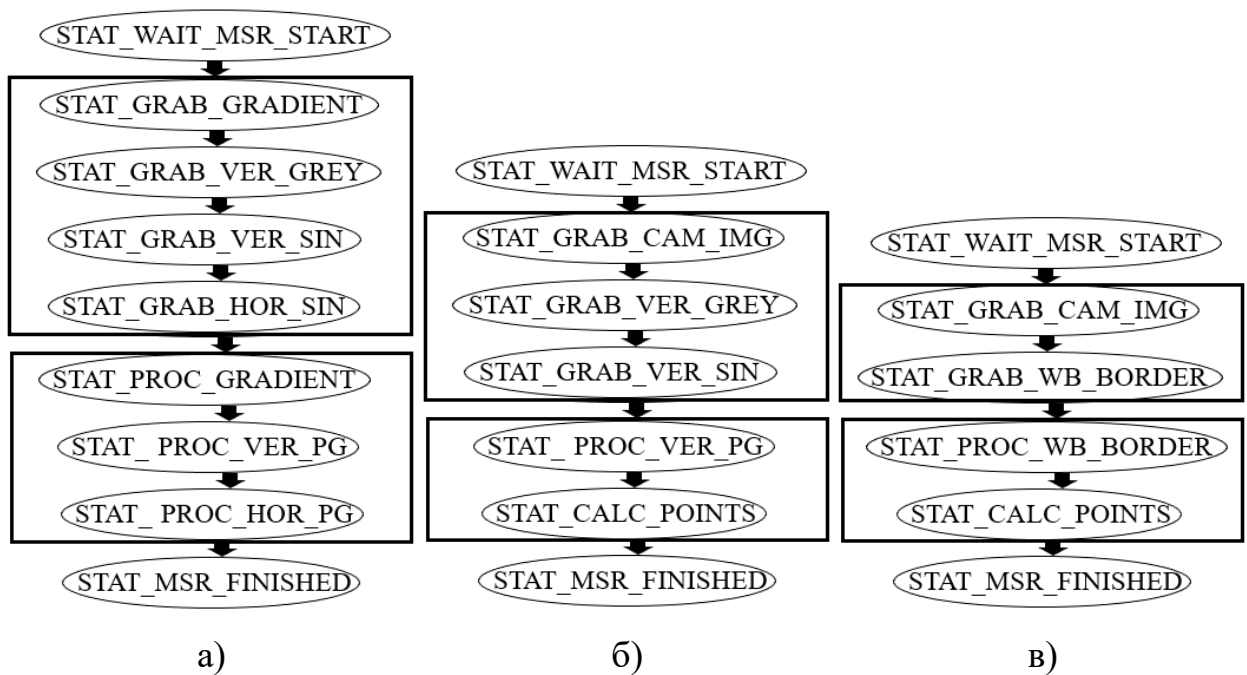


Рис. 3.28. Машины состояний для процессов: калибровки триангуляционного измерительного модуля (а), диагностики трехмерной геометрии методами фазовой триангуляции (б) и оптической триангуляции с использованием динамического светового сечения (в).

Управление источником освещения реализовано с помощью класса ProjManager, имеющего следующие методы:

- Init(int ScreenNum, double ProjTimeSec);
- Deinit();
- Size GetSize();
- Image ShowGreyCode(int Num, bool Vertical);
- Image ShowSinPattern(double Freq, double DeltaPhase, bool Vertical);
- Image ShowWhiteBlackBorder(int BorderCoord);
- Image ShowConstI(int Intensity).

Метод Init(ScreenNum, ProjTimeSec) на экране компьютера с номером ScreenNum открывает полноразмерное окно Form (рис. 3.29) и сохраняет ProjTimeSec – время ожидания проецирования структурированного изображения после его установки в данное окно. Метод Deinit() осуществляет закрытие окна Form. Метод GetSize() возвращает размеры окна Form. Метод ShowGreyCode(Num) осуществляет создание и установку в окно Form

двоично-кодированного структурированного изображения с порядковым номером Num, реализующего коды Грея. Параметр Vertical определяет ориентацию созданного изображения. Метод ShowSinPattern(Freq, DeltaPhase, Vertical) осуществляет создание и установку в окно Form структурированного изображения с гармоническим распределением интенсивности с частотой Freq и сдвигом фазы DeltaPhase. Параметр Vertical определяет ориентацию созданного изображения. Метод ShowWhiteBlackBorder(BorderCoord) осуществляет создание и установку в окно Form структурированного изображения в виде белого и черного прямоугольников, координата границы между которыми равна BorderCoord. Метод ShowConstI(Intensity) осуществляет создание и установку в окно Form изображения с значением яркости Intensity.

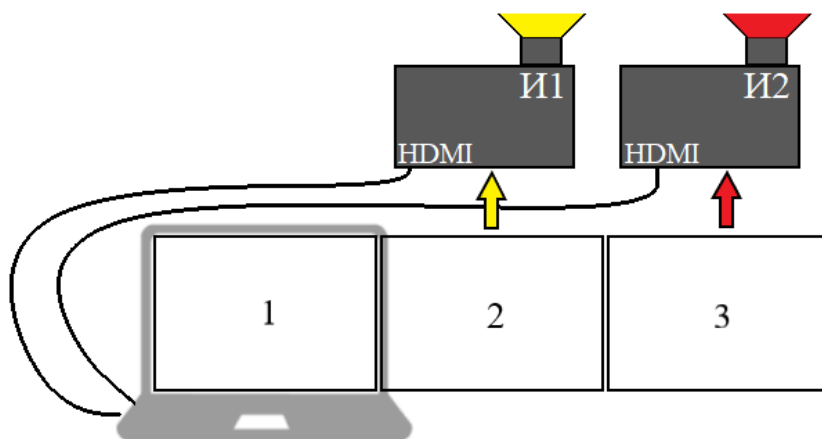


Рис. 3.29. Управление структурированными изображениями, формируемыми источниками излучения И1 и И2. Экран 1: основное окно приложения. Экраны 2 и 3, ассоциированные с источниками И1 и И2: окна с формируемыми изображениями.

Управление фотоприемником реализовано с помощью интерфейса ICamManager, имеющего следующие методы:

- bool Init();
- void Deinit();
- Image GetImage();
- void SetExposure(double ExposureSec).

Метод `Init()` устанавливает соединение с фотоприемником и создает поток захвата его изображений. Метод `Deinit()` закрывает соединение с фотоприемником и освобождает используемые ресурсы. Метод `GetImage()` возвращает текущее зарегистрированное фотоприемником изображение. Метод `SetExposure(ExposureSec)` устанавливает внутренние параметры фотоприемника по умолчанию, усиление в минимальное значение, а значение экспозиции равным `ExposureSec`.

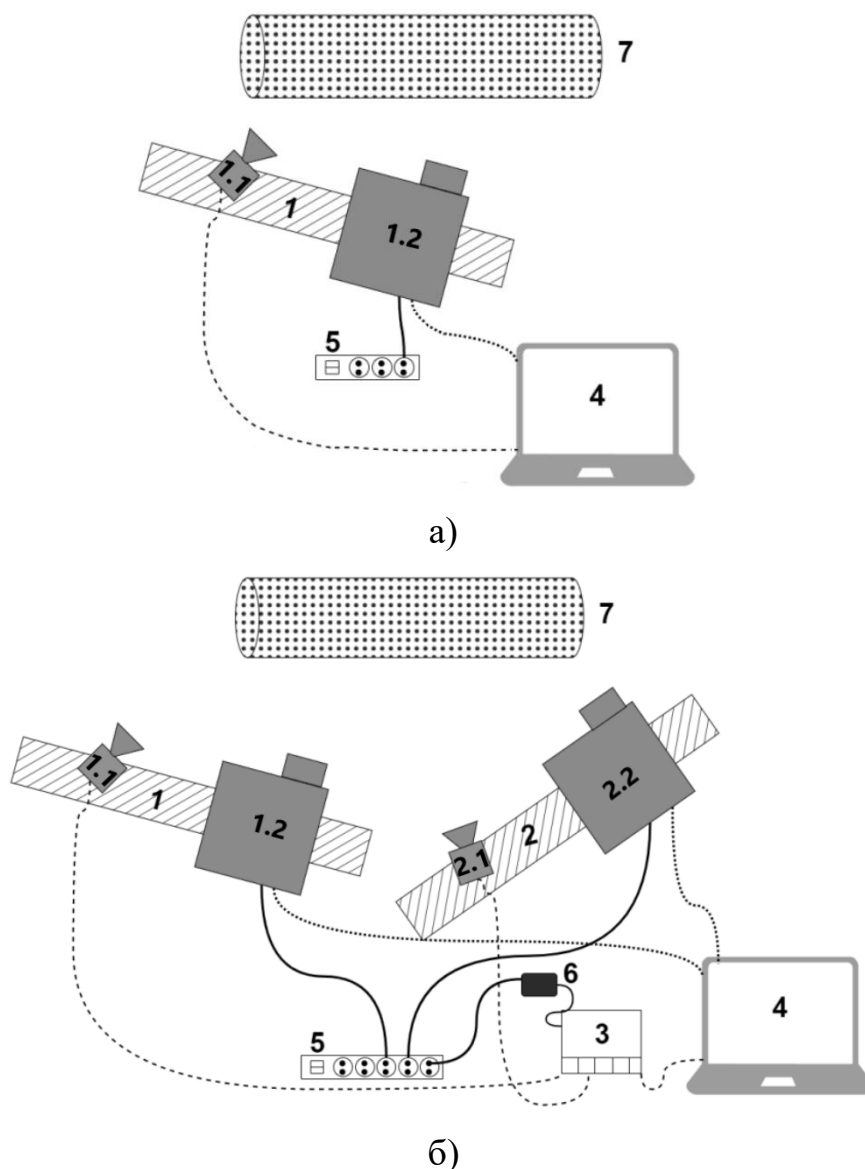


Рис. 3.30. Схемы подключения оптических элементов адаптивных триангуляционных систем, состоящих из 1 (а) и 2 (б) измерительных модулей. 1.1, 1.2 и 2.1, 2.2 – фотоприемник и источник излучения измерительных модулей №1 и №2, 3 – синхронизирующий процессор PoE, 6 – его источник питания, 4 – компьютер, 5 – сетевой фильтр, 7 – объект.

С использованием интерфейсов подключения источников и функционального SDK фотоприемников организовано одновременное управление несколькими измерительными модулями в составе адаптивной триангуляционной системы (рис. 3.30)

В результате разработано и реализовано программное обеспечение адаптивных триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

3.5. Выводы по главе 3

1) Предложены методы автоматизированной калибровки триангуляционных систем с регрессионным и дифференциальным анализом фазовых распределений для высокоинформативного контроля трехмерной геометрии объектов с адаптивным пространственным разрешением в условиях нелинейных оптических искажений.

2) Реализована аппаратная часть адаптивных триангуляционных систем для прецизионного контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде, геометрических параметров различных видов наледи на климатическом и аэродинамическом стендах и трехмерной геометрии поверхности в процессе сублимации на аэродинамическом стенде для расчета локальных коэффициентов массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок.

3) Спроектировано программное обеспечение адаптивных триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике.

Глава 4. Испытания адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике

4.1. Лабораторные испытания адаптивных триангуляционных систем

Для верификации работоспособности и анализа метрологических характеристик разработанных адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике выполнены их лабораторные испытания, в рамках которых поставлены и решены следующие задачи:

- 1) экспериментальная оценка погрешности контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в условиях нелинейных оптических искажений адаптивными системами фазовой триангуляции;
- 2) экспериментальная оценка погрешности контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей в условиях нелинейных оптических искажений адаптивными системами оптической триангуляции на основе динамического светового сечения;
- 3) подтверждение работоспособности разработанных адаптивных методов триангуляционного контроля трехмерных деформаций;
- 4) подтверждение работоспособности разработанного метода взаимной калибровки триангуляционных модулей для контроля трехмерной геометрии объектов с адаптивным локальным пространственным разрешением;
- 5) анализ систематической погрешности контроля трехмерной геометрии объекта адаптивной триангуляционной системой при его длительной диагностике.

Экспериментальные оценки метрологических характеристик получены с использованием аппаратной части адаптивной триангуляционной системы для прецизионного контроля трехмерной геометрии наледи на климатическом стенде ИТ СО РАН для исследований процессов обледенения объектов

энергетики (рис. 3.10), из которой на время лабораторных испытаний был исключен триангуляционный модуль диагностики трехмерной геометрии наледи с повышенным пространственным разрешением. Для моделирования нелинейных оптических искажений между областью размещения диагностируемого объекта и аппаратной частью адаптивной триангуляционной системы расположена стеклянная пластина толщиной 4 мм (рис. 4.1). Выполнена калибровка адаптивной триангуляционной системы с помощью параллельных сдвигов плоской мишени и измерений фазовой триангуляцией. Размер (XYZ) измерительного объема составил порядка (163 x 95 x 50) мм.

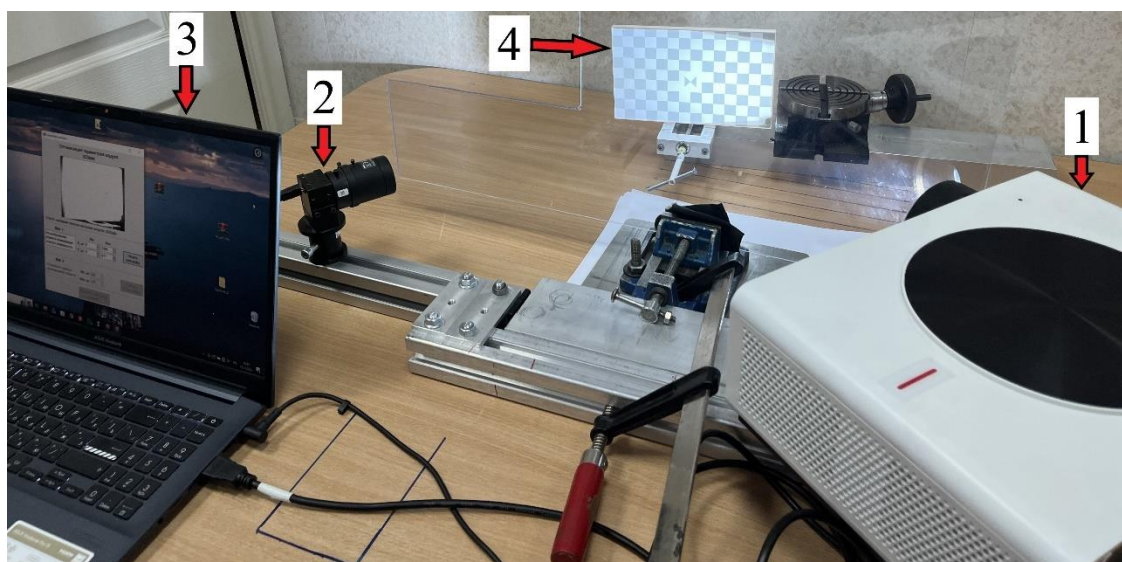


Рис. 4.1. Стенд для оценки метрологических характеристик адаптивных триангуляционных систем. 1 – цифровой проектор TouYinGer Q9 с доработанной оптической системой, 2 – фотоприемник The Imaging Source DMK 72BUC02, 3 – компьютер, 4 – калибровочная мишень.

Для оценки погрешности контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в условиях нелинейных оптических искажений в измерительном объеме расположен текстурированный объект, размещенный в механизме линейного перемещения (рис. 4.1). Последовательно выполнены измерение его трехмерной геометрии адаптивным методом фазовой триангуляции, линейное перемещение объекта на 2 мм, моделирующее его

равномерную деформацию в одном направлении, и повторное измерение. С помощью разработанного программного обеспечения, реализующего метод контроля трехмерных деформаций поверхностей с наличием в текстуре характерных, отличительных особенностей, выполнен поиск смещений участков на зарегистрированных фотоприемником изображениях до и после деформации (рис. 4.2) и их преобразование в трехмерные векторы деформации (рис. 4.3). Поиск смещений реализован с шагом 25 пикселей для областей размером 100 пикселей. На основе восстановленных векторов деформации (рис. 4.4) установлено ее среднее значение: 2.024 мм, а также среднеквадратичное отклонение: 8 мкм, что соответствует 0.016 % от глубины измерительного объема и является оценкой погрешности контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов в условиях нелинейных оптических искажений адаптивными системами фазовой триангуляции.

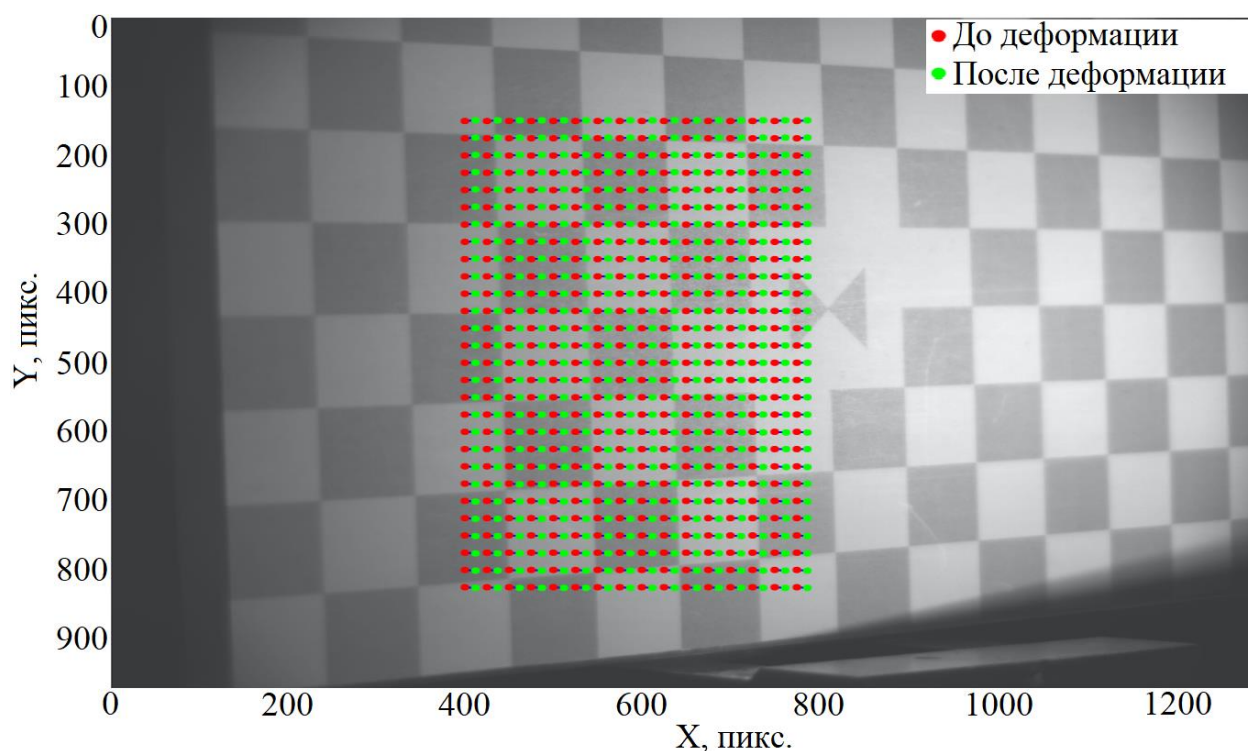


Рис. 4.2. Результат поиска смещений участков поверхности текстурированного объекта на изображении фотоприемника.

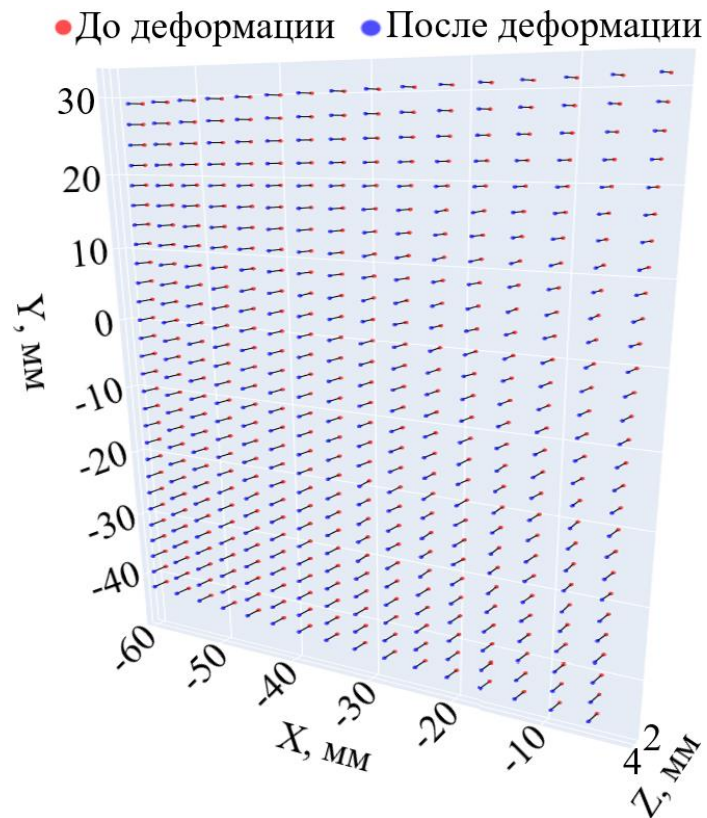


Рис. 4.3. Результат восстановления трехмерных векторов деформации участков поверхности текстурированного объекта.

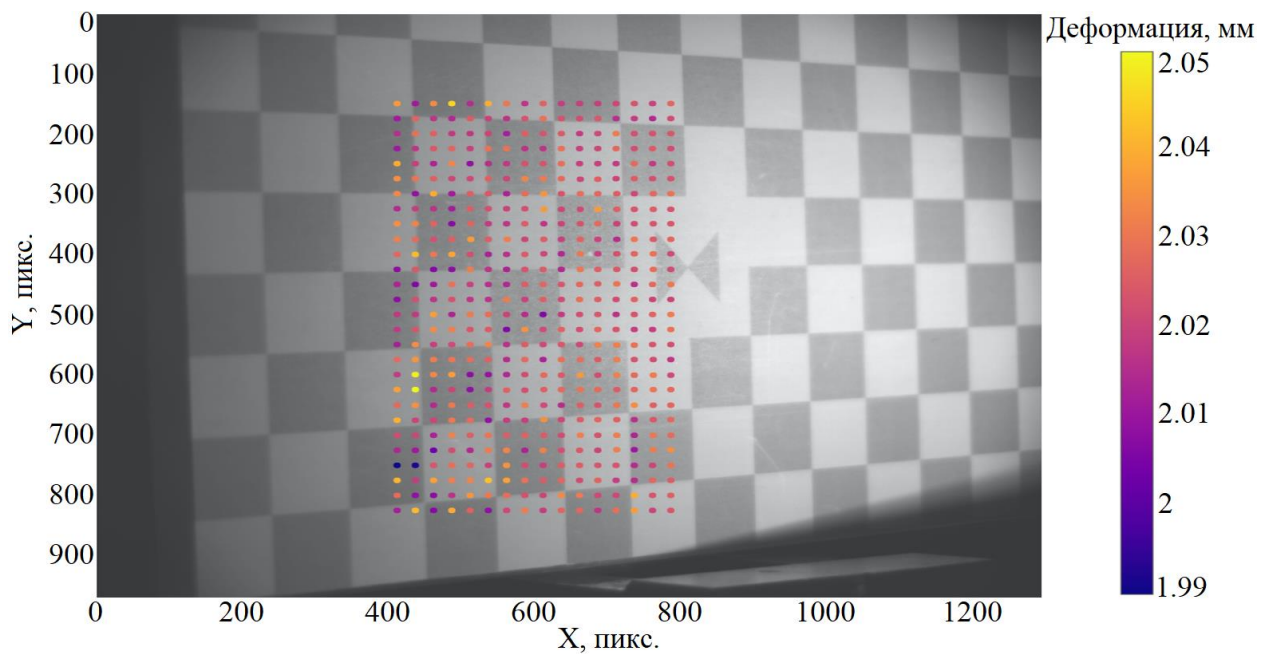


Рис. 4.4. Результат расчета деформации участков поверхности текстурированного объекта.

Для оценки погрешности контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей в условиях нелинейных оптических

искажений в измерительном объеме расположена стеклянная пластина ПИ-120 (рис. 4.5) с отклонением плоскостности на уровне 0.2 мкм, размещенная в механизме линейного перемещения. С шагом 1 мм выполнены 2 линейных перемещения пластины ПИ-120 и на каждой итерации измерение ее трехмерной геометрии адаптивным методом оптической триангуляции на основе динамического светового сечения. Среднеквадратичное отклонение измеренных трехмерных точек пластины от аппроксимирующей их плоскости (рис. 4.6) составило 54 мкм. На основе ближайших трехмерных точек из наборов, соответствующих результатам контроля трехмерной геометрии пластины в положениях №1 и №2, восстановлено направление (XYZ) ее линейного перемещения: (0.124; -0.018; 0.910). С помощью разработанного программного обеспечения, реализующего метод контроля трехмерных деформаций в заданном направлении, восстановлено поле деформаций пластины (рис. 4.7, 4.8), рассчитаны их среднее значение: 2.002 мм и среднеквадратичное отклонение: 34 мкм, что соответствует 0.068 % от глубины измерительного объема и является оценкой погрешности контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей в условиях нелинейных оптических искажений адаптивными системами оптической триангуляции на основе динамического светового сечения.

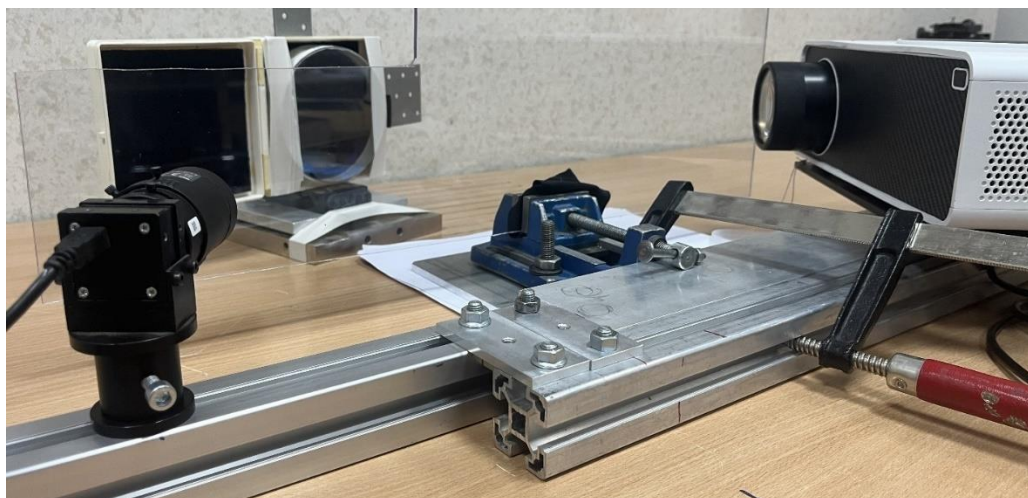


Рис. 4.5. Пластина ПИ-120 в механизме линейного перемещения.

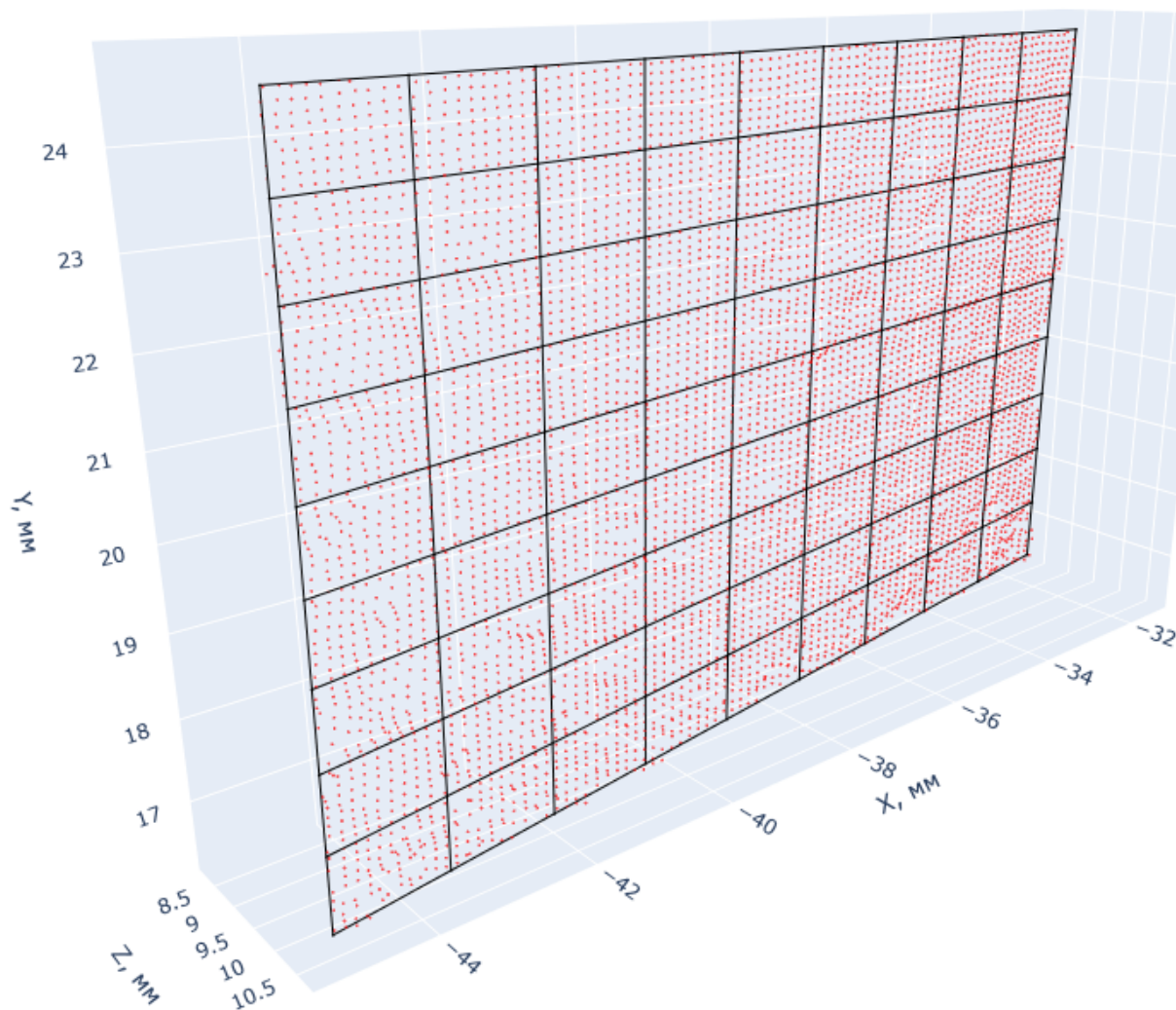


Рис. 4.6. Аппроксимация плоскостью измеренных трехмерных точек пластины ПИ-120.

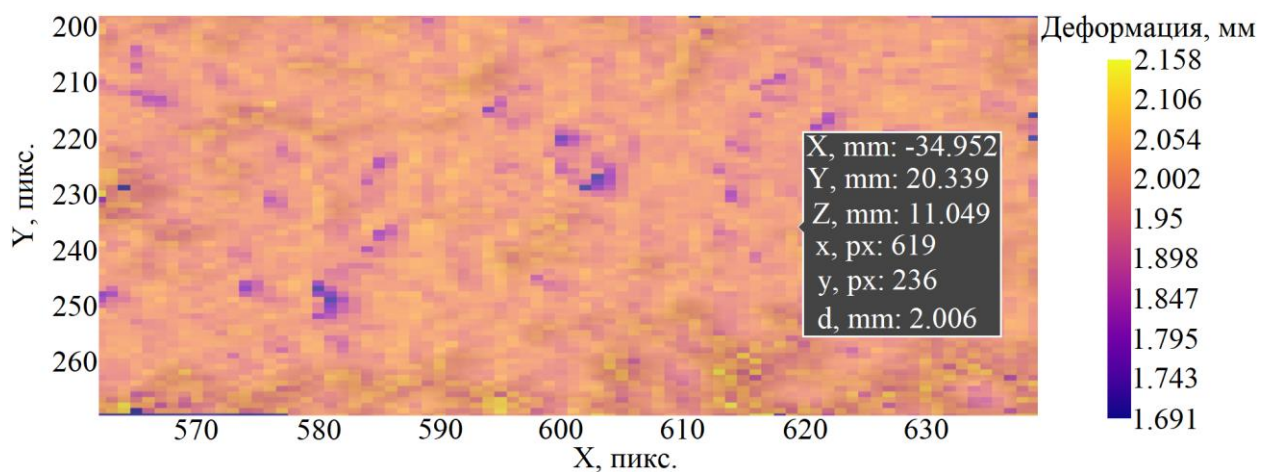


Рис. 4.7. Восстановленное двумерное поле деформаций пластины ПИ-120.

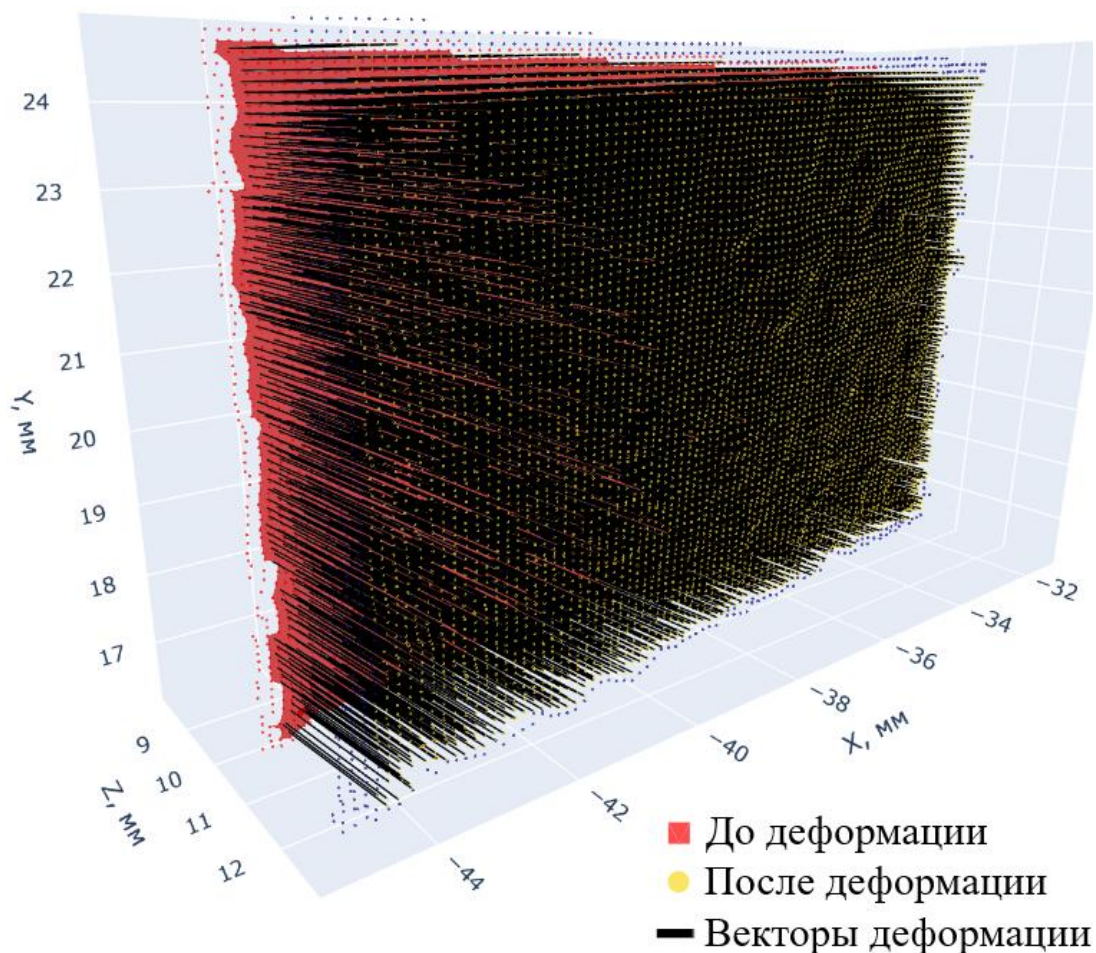


Рис. 4.8. Восстановленное трехмерное поле деформаций пластины ПИ-120.

Подтверждена работоспособность разработанного метода взаимной калибровки триангуляционных модулей для контроля трехмерной геометрии объектов с адаптивным локальным пространственным разрешением (рис. 4.9). Для этого использована адаптивная триангуляционная система для прецизионного контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения на силовом стенде, состоящая из 2 измерительных модулей (рис. 3.13). Разрешения фотоприемников программно установлены (518 x 388), что соответствует пространственным разрешениям триангуляционных модулей на уровне 3.75 и 1.14 мм. Для восстановления преобразования между декартовыми системами координат триангуляционных модулей в области пересечения их измерительных объемов размещен сложнопрофильный объект. Из наборов измеренных трехмерных координат поверхности выбрано 191 соответствие с

минимальной суммой квадратов разности фазовых распределений (рис. 4.9, а), на основе которых восстановлена матрица поворота и вектор трансляции между системами координат триангуляционных модулей. Выполнено сведение результатов трехмерных измерений в единую декартову систему (рис. 4.9, б). Среднеквадратичное отклонение расстояний между трехмерными точками, использовавшимися для восстановления целевого преобразования, составило ~ 1.6 мм.

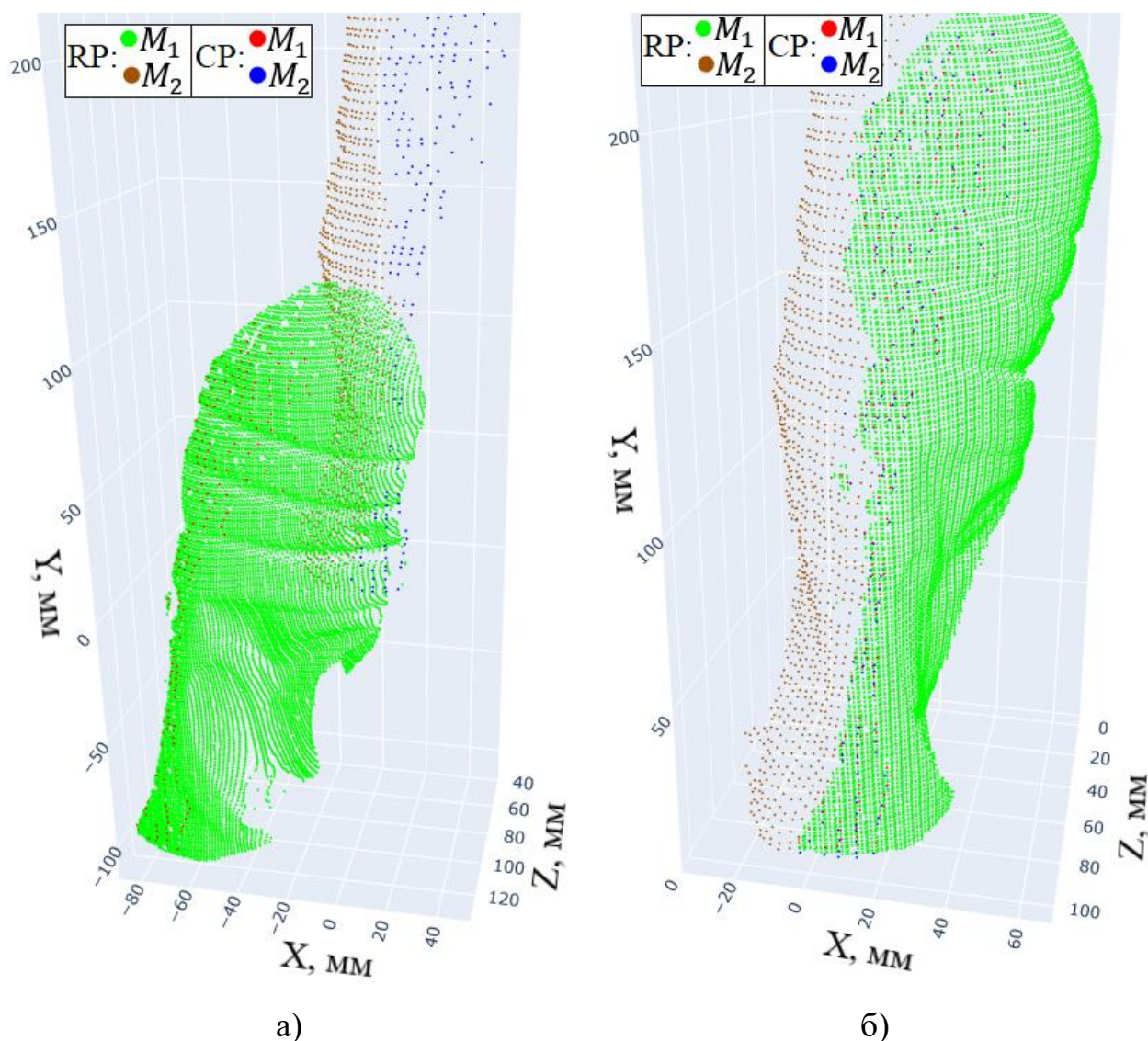


Рис. 4.9. Взаимная калибровка триангуляционных модулей M_1 и M_2 (а) и согласование их результатов контроля трехмерной геометрии(б). CP – трехмерные точки, участвующие в взаимной калибровке триангуляционных модулей, RP – остальные трехмерные точки.

Выполнен анализ систематической погрешности контроля трехмерной геометрии объекта адаптивной триангуляционной системой при его длительной диагностике. Для этого использованы тест-объект в виде калибровочной мишени, фотоприемник The Imaging Source DMK 72BUC02 и термостатированный цифровой проектор TouYinGer Q10 с доработанной оптической системой (рис. 3.18) и возможностью ручного включения/выключения режима термостабилизации. Выполнены 3 серии измерений трехмерной геометрии диагностируемого объекта адаптивным методом фазовой триангуляции, в каждой из которых на время измерений объект и адаптивная триангуляционная система оставались неподвижными. В серии №1 режим термостабилизации был выключен, в серии №2 режим термостабилизации был включен, в серии №3 режим термостабилизации был включен, а также на область между измерительной системой и объектом был направлен воздушный поток.

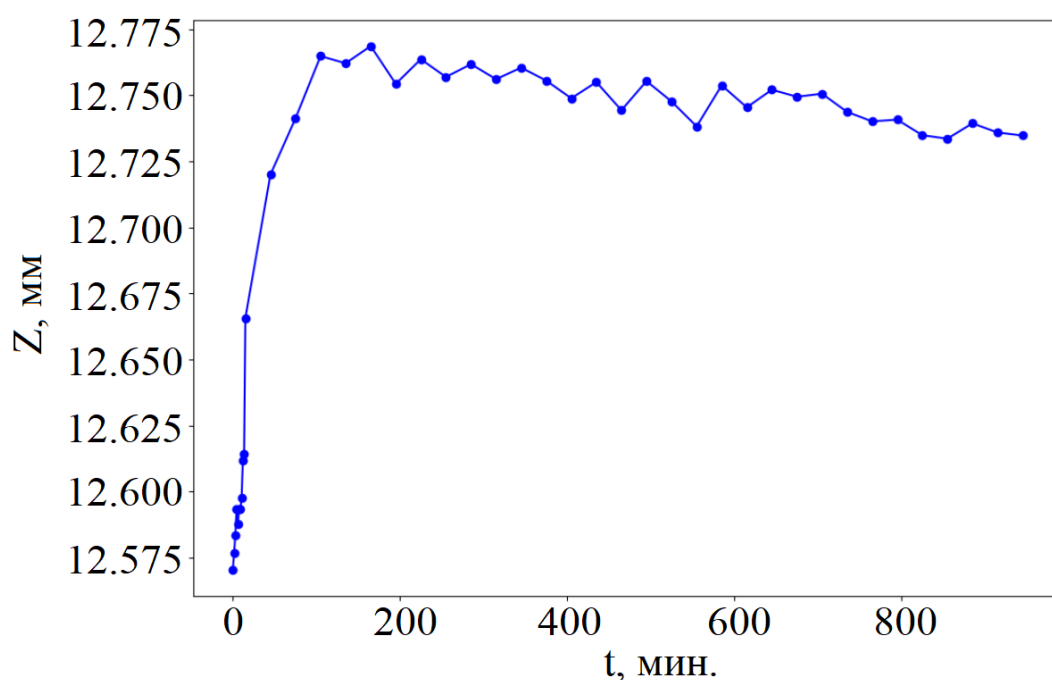


Рис. 4.10. Временная зависимость измеренной Z-координаты регистрируемого участка поверхности при выключенном режиме термостабилизации цифрового проектора TouYinGer Q10.

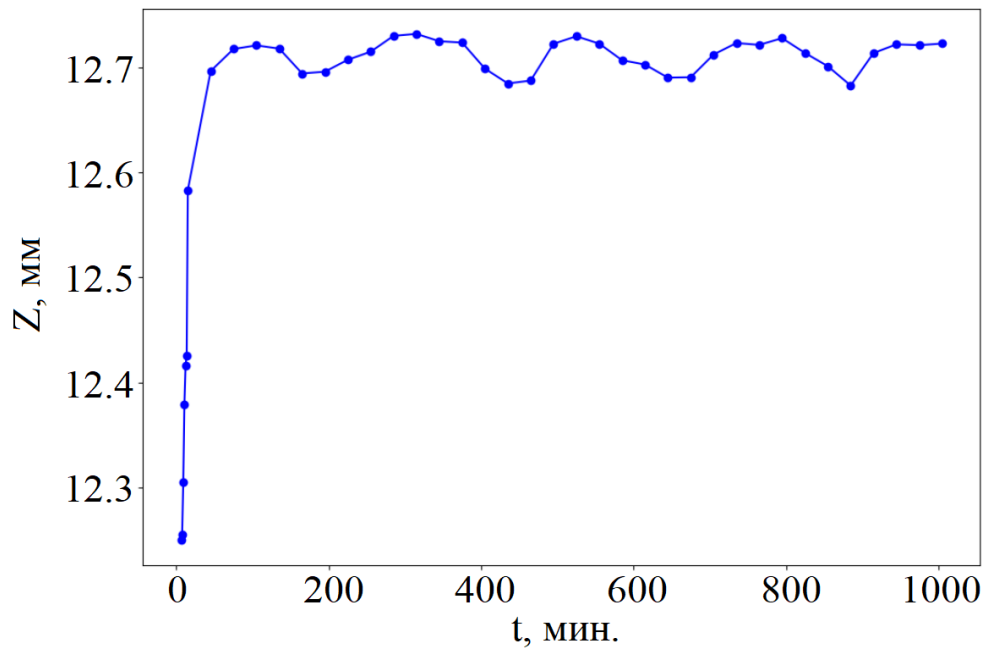


Рис. 4.11. Временная зависимость измеренной Z -координаты регистрируемого участка поверхности при включенном режиме термостабилизации цифрового проектора TouYinGer Q10.

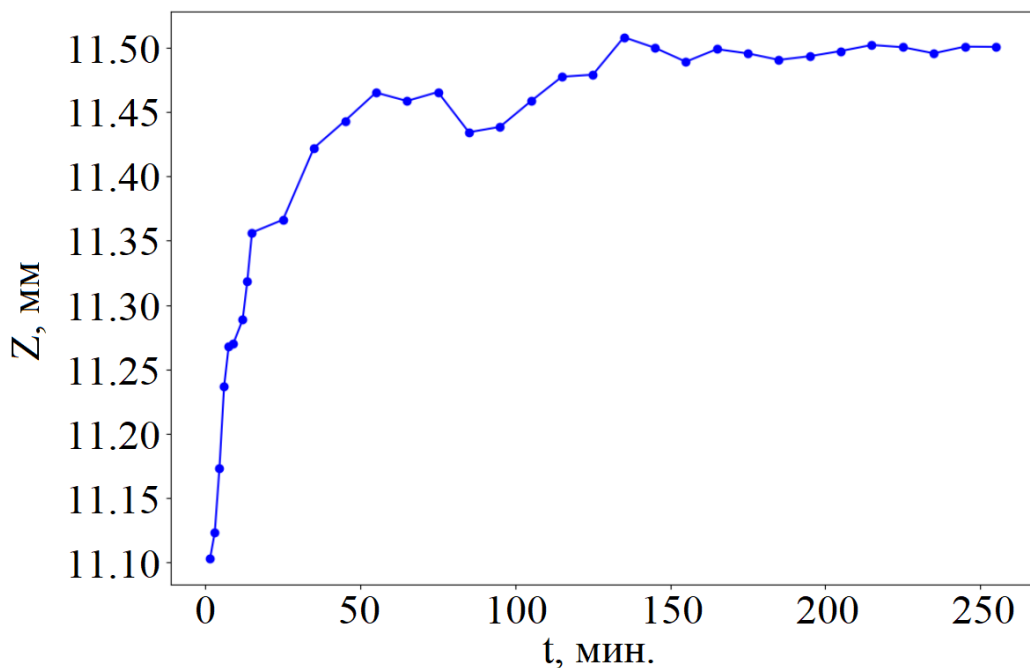


Рис. 4.12. Временная зависимость измеренной Z -координаты регистрируемого участка поверхности при включенном режиме термостабилизации цифрового проектора TouYinGer Q10 и направленном воздушном потоке на область между измерительной системой и объектом.

Для анализа результатов измерений в каждой серии выбран элемент матрицы фотоприемника, для которого восстановлена временная зависимость

измеренной Z -координаты регистрируемого в нем участка поверхности (рис. 4.10, 4.11, 4.12). Можно сделать вывод, что без термостатирования источника оптического излучения в составе адаптивной триангуляционной системы результаты измерений трехмерной геометрии линейно изменяются со скоростью ~ 2.5 мкм / час (рис. 4.10). Показано, что при включенном режиме термостабилизации цифрового проектора TouYinGer Q10 возникает нелинейная систематическая погрешность трехмерных измерений, вероятно, обусловленная формированием термоградиентной среды между измерительной системой и объектом (рис. 4.11). Данное утверждение подтверждается отсутствием систематической погрешности трехмерных измерений при выходе адаптивной триангуляционной системы в рабочий режим после ~ 150 минут от ее запуска при включенном режиме термостабилизации цифрового проектора TouYinGer Q10 и направленном воздушном потоке на область между измерительной системой и объектом (рис. 4.12). Таким образом, восстановлены характеры систематической погрешности при длительной диагностике трехмерной геометрии объекта адаптивной триангуляционной системой при отсутствии и наличии термостабилизации источника оптического излучения.

В результате лабораторных испытаний выполнена верификация работоспособности разработанных адаптивных триангуляционных систем. Показано, что использование метода фазовой триангуляции с адаптивной компенсацией нелинейности приемно-передаточной функции в условиях ограниченного динамического диапазона оптической системы обеспечивает возможность контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов с погрешностью на уровне 0.02 % от глубины измерительного объема. Применение адаптивного метода оптической триангуляции на основе пространственно-временной модуляции интенсивности в виде динамического светового сечения обеспечивает возможность контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей с погрешностью на уровне 0.07 % от глубины измерительного объема.

4.2. Производственные испытания адаптивных триангуляционных систем в машиностроении и энергетике

Для демонстрации степени готовности разработанных адаптивных триангуляционных систем и обеспечения возможности дистанционного контроля трехмерной геометрии и деформаций исследуемых объектов представлены результаты их производственных испытаний и практического применения на действующих аэродинамических, климатическом и силовом экспериментальных стендах в задачах машиностроения и энергетики.

Для верификации метрологических характеристик и работоспособности разработанной адаптивной триангуляционной системы для прецизионного контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения выполнены ее производственные испытания на действующем силовом стенде. С использованием адаптивной триангуляционной системы выполнены измерения трехмерной геометрии калиброванной плоской металлической пластины в процессе ее статического нагружения (рис. 4.13).

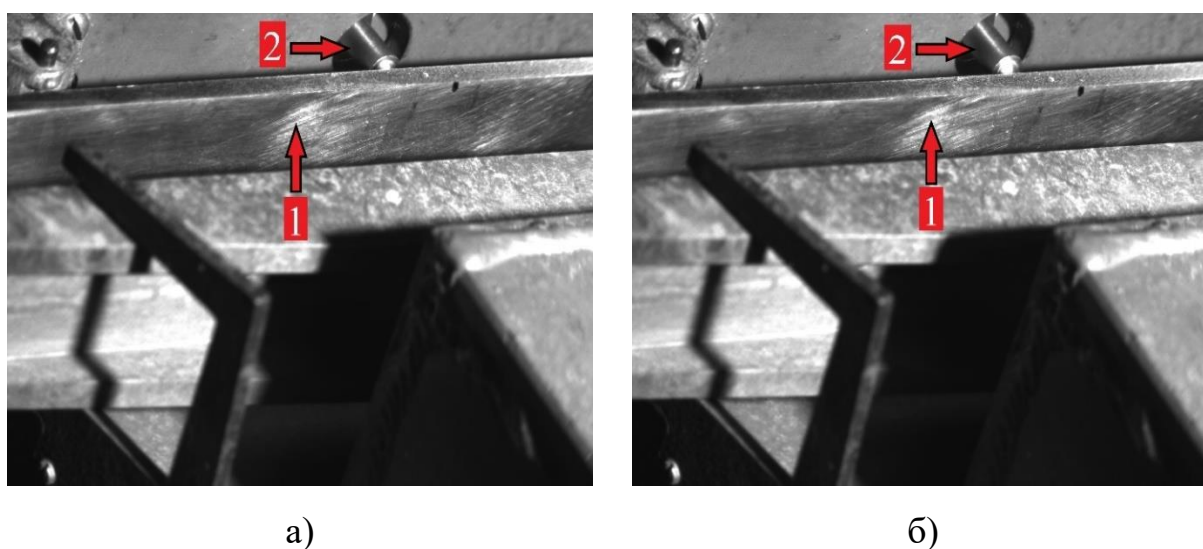
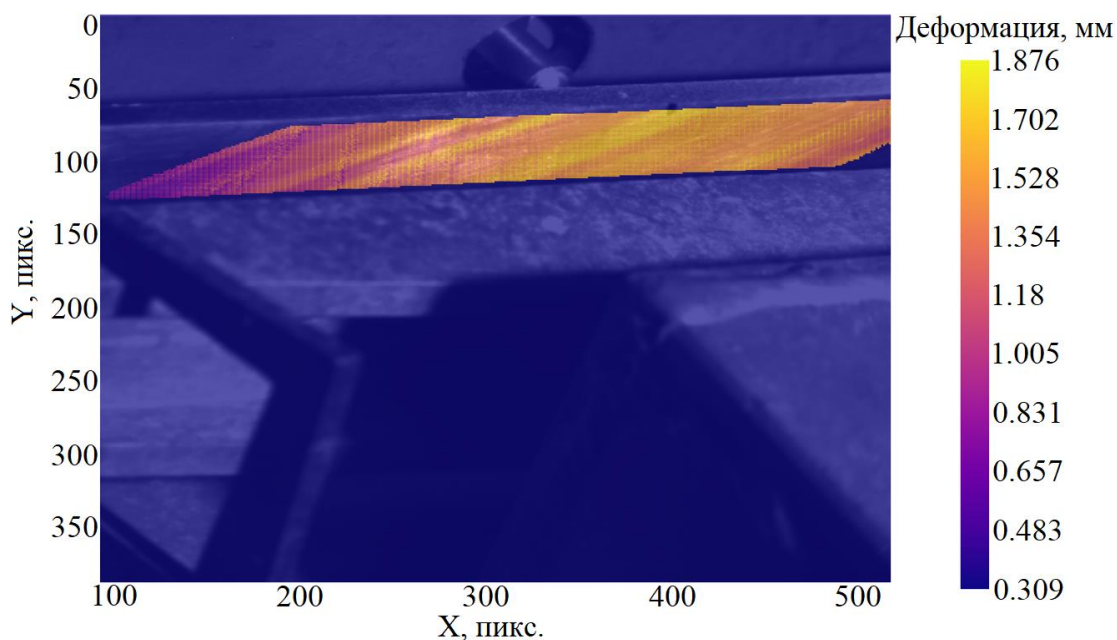
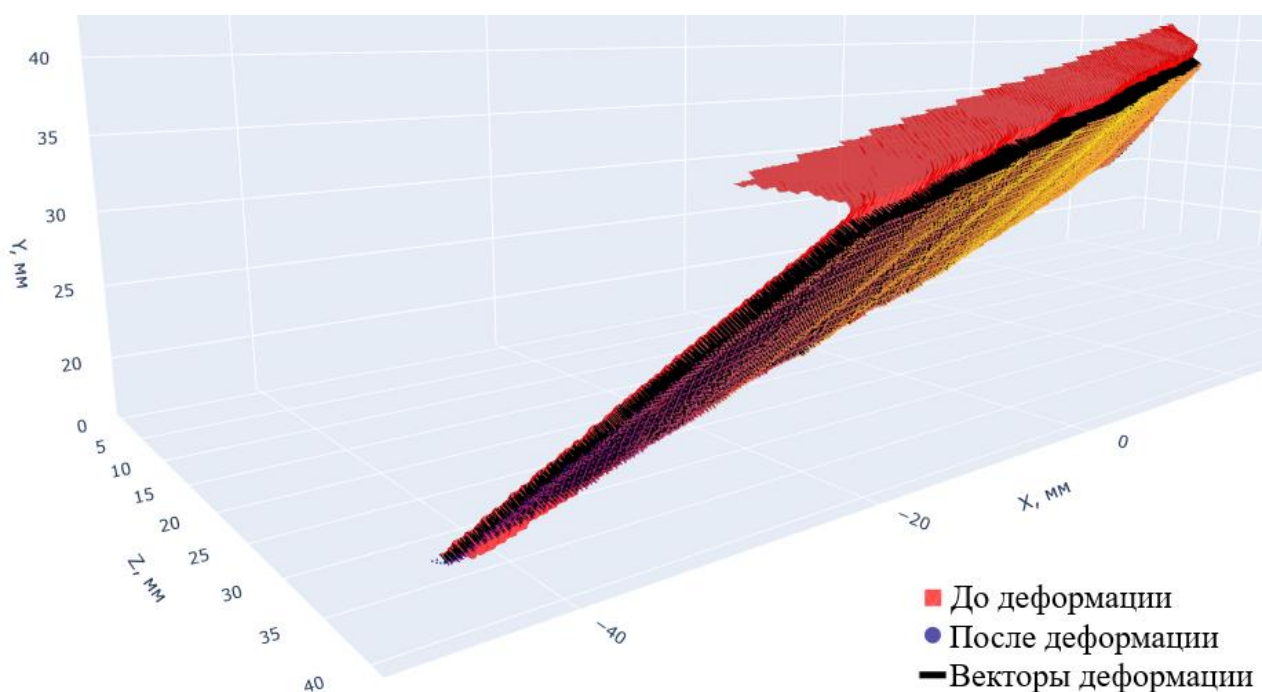


Рис. 4.13. Металлическая пластина (1) до (а) и после (б) деформации под давлением вала (2) на силовом стенде.

На основе полученных измерительных данных восстановлены поля деформаций металлической пластины: в направлении нормали к ее поверхности (рис. 4.14) и на основе смещений участков поверхности на изображении фотоприемника (рис. 4.15, 4.16).

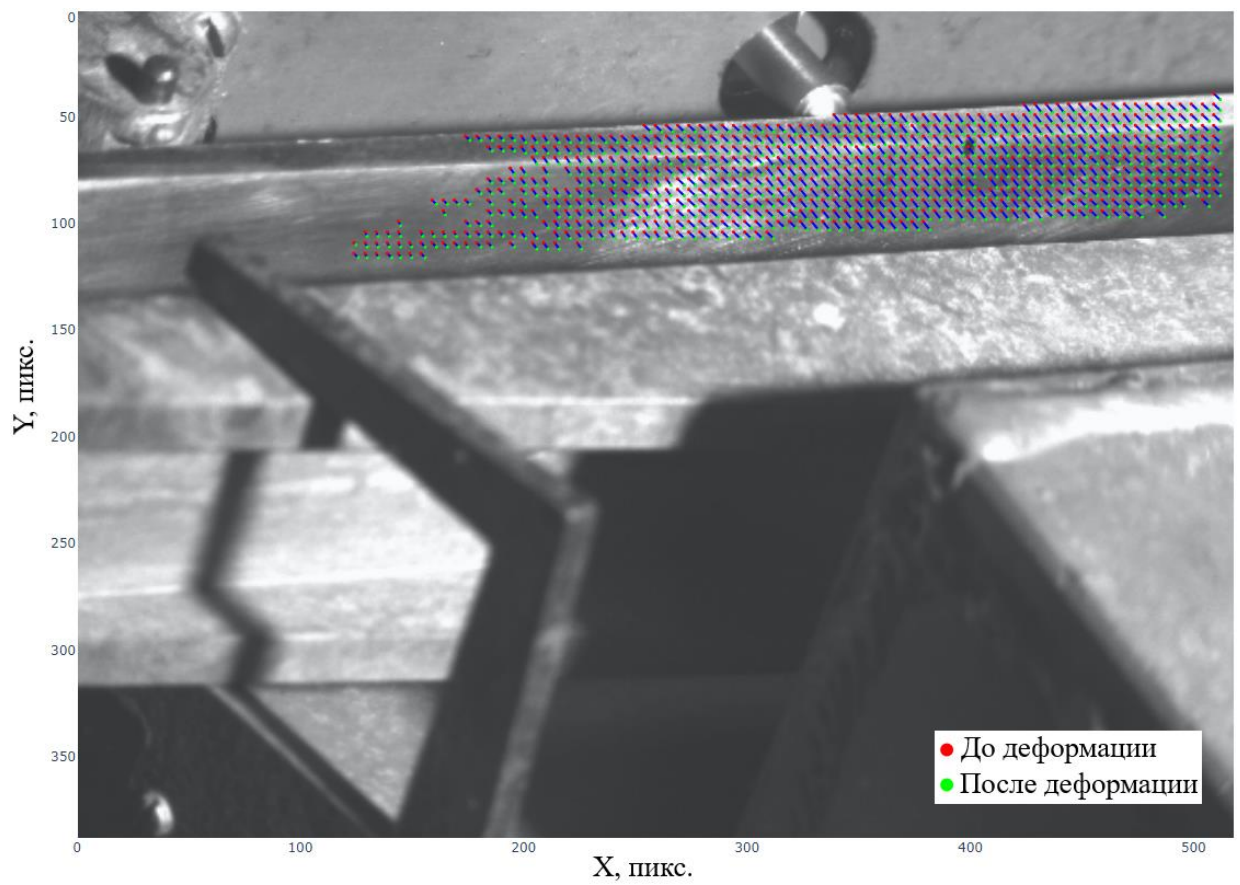


а)

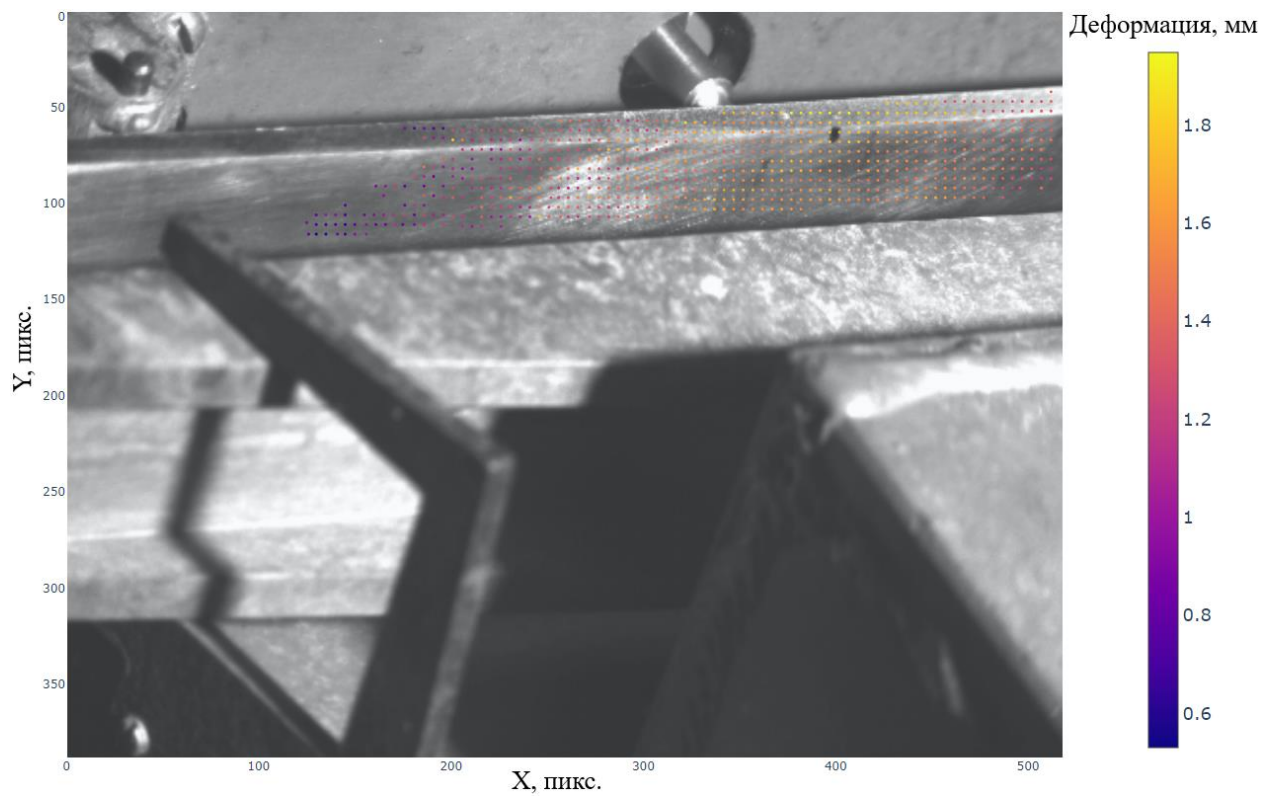


б)

Рис. 4.14. Двумерное (а) и трехмерное (б) поля деформаций металлической пластины в направлении нормали к ее поверхности.



а)



б)

Рис. 4.15. Смещения участков металлической пластины на изображении фотоприемника (а) и двумерное поле ее деформаций (б).

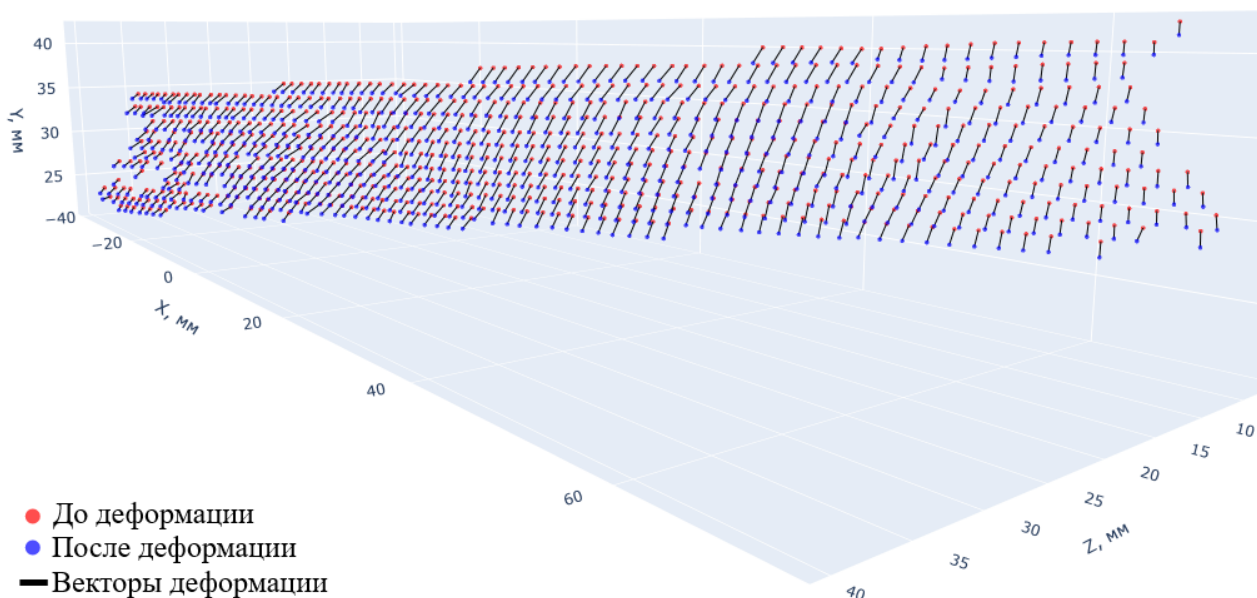
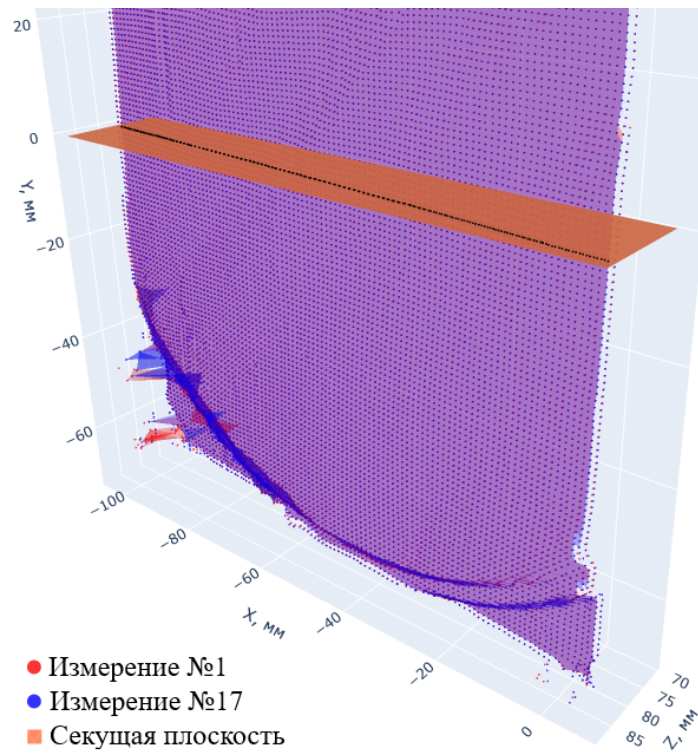


Рис. 4.16. Поле трехмерных деформаций металлической пластины, восстановленное на основе смещений участков поверхности на изображении фотоприемника.

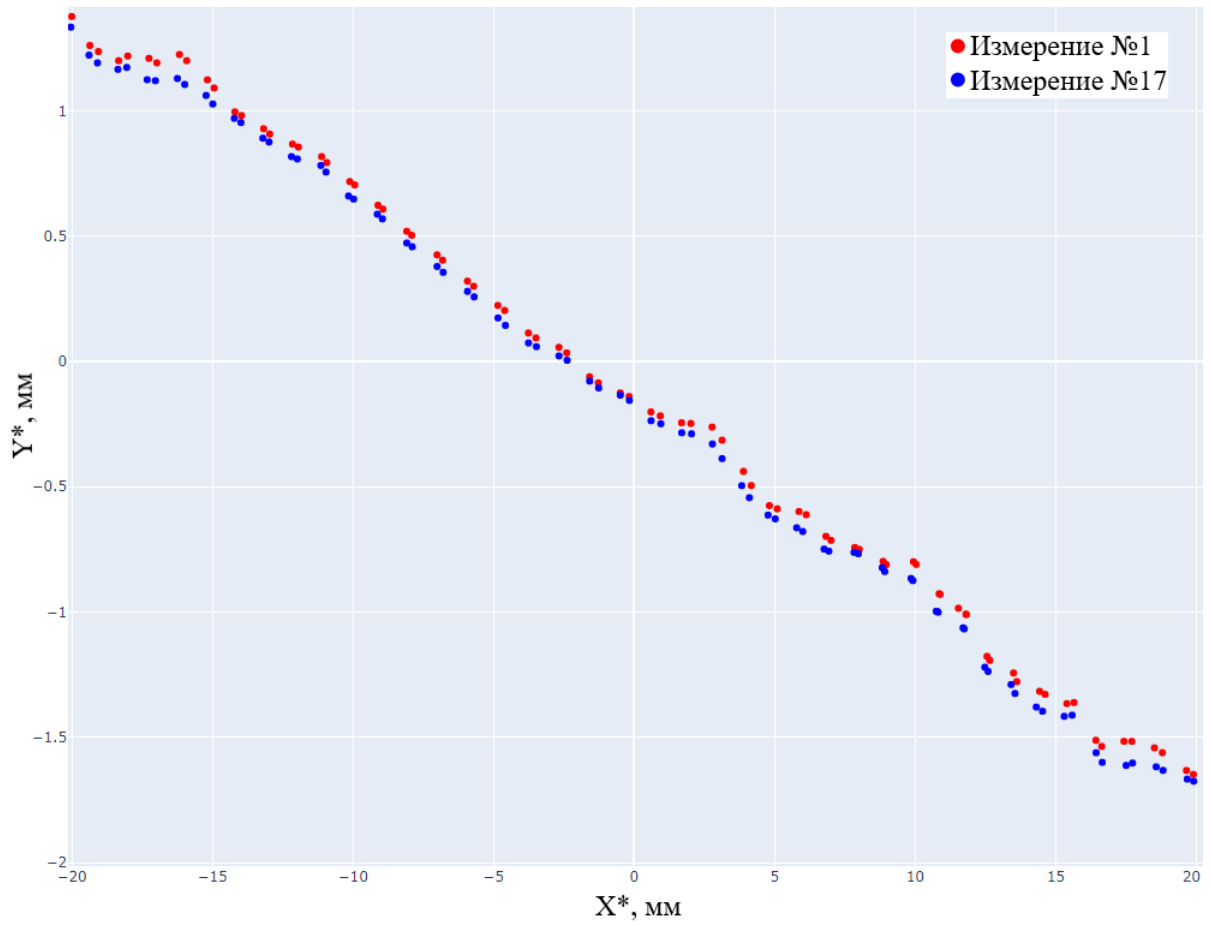
Отклонение результатов расчета деформаций от справочных данных тензометрической диагностики составило менее 0.02 % от глубины измерительного объема. В результате обеспечен требуемый малый уровень погрешности триангуляционного контроля деформаций трехмерного профиля объектов в процессе статического нагружения.

Разработанные адаптивные триангуляционные системы также получили широкое практическое применение и в задачах энергетики на действующих аэродинамических и климатическом экспериментальных стендах.

С помощью применения адаптивной триангуляционной системы (рис. 3.14) на действующем аэродинамическом стенде закрытого типа в институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН (рис. 3.15) обеспечена возможность бесконтактного контроля трехмерной геометрии (рис. 4.17) поверхности спрессованного в форму нафталина (рис. 4.18) в процессе сублимации для расчета локальных коэффициентов массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок.



а)



б)

Рис. 4.17. Контроль изменения толщины участков поверхности нафталина (б) на основе результатов измерения его трехмерной геометрии (а).

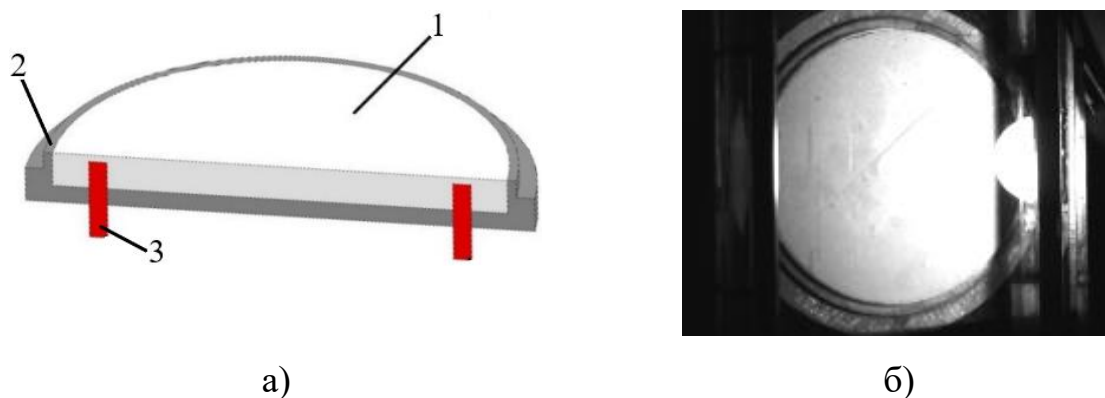


Рис. 4.18. Трехмерная модель и зарегистрированное фотоприемником в составе адаптивной триангуляционной системы изображение поверхности нафталина (1), спрессованного в форму (2). 3 – термопары.

Для анализа эффективности противообледенительных технологий и исследований процессов обледенения ветрогенераторов разработанная адаптивная триангуляционная система (рис. 3.16) применена на действующем аэродинамическом стенде института теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН. Показана возможность динамического контроля трехмерного профиля наледи «иней» и «изморозь» на основе результатов адаптивной фазовой триангуляции модели лопасти ветрогенератора (4.19).

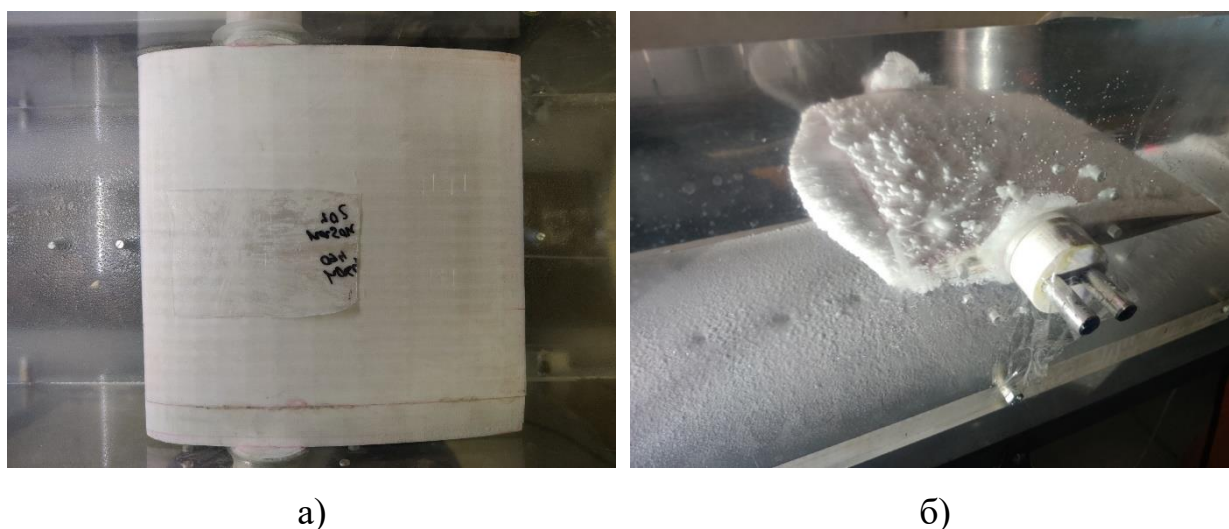


Рис. 4.19. Модель лопасти ветрогенератора с противообледенительным покрытием внутри аэродинамического стенда до (а) и после (б) обледенения.

Для анализа эффективности противообледенительных технологий и исследований процессов обледенения объектов энергетики разработанная

адаптивная триангуляционная система (рис. 3.10) применена на действующем климатическом стенде института теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН. Показана возможность динамического контроля трехмерного профиля различных видов наледи: «иней», «изморозь» и «glaze» (рис. 4.20, 4.21, 4.22) на основе результатов оптической триангуляции с использованием динамического светового сечения.

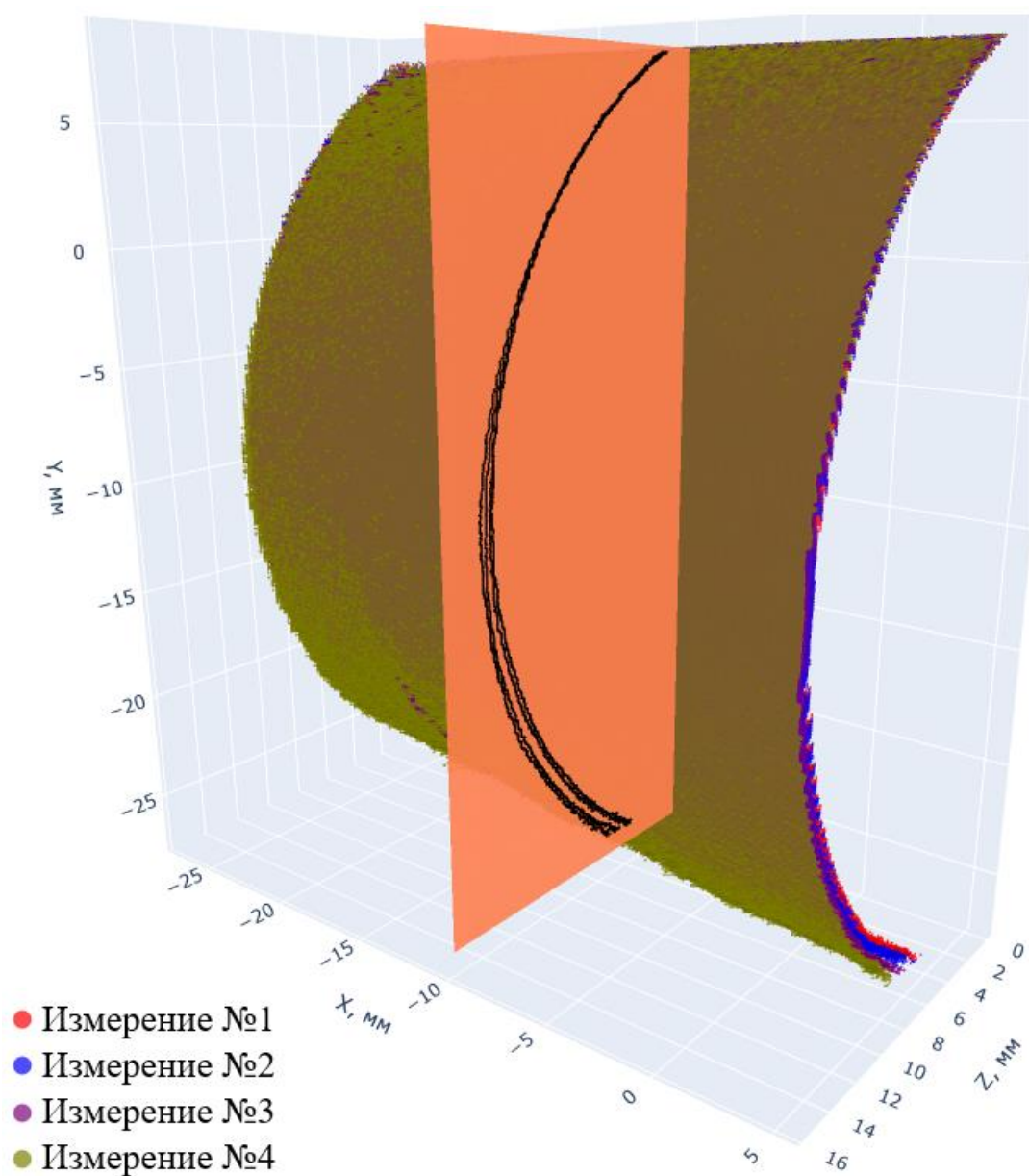


Рис. 4.20. Плоский срез трехмерных профилей наледи типа «glaze».

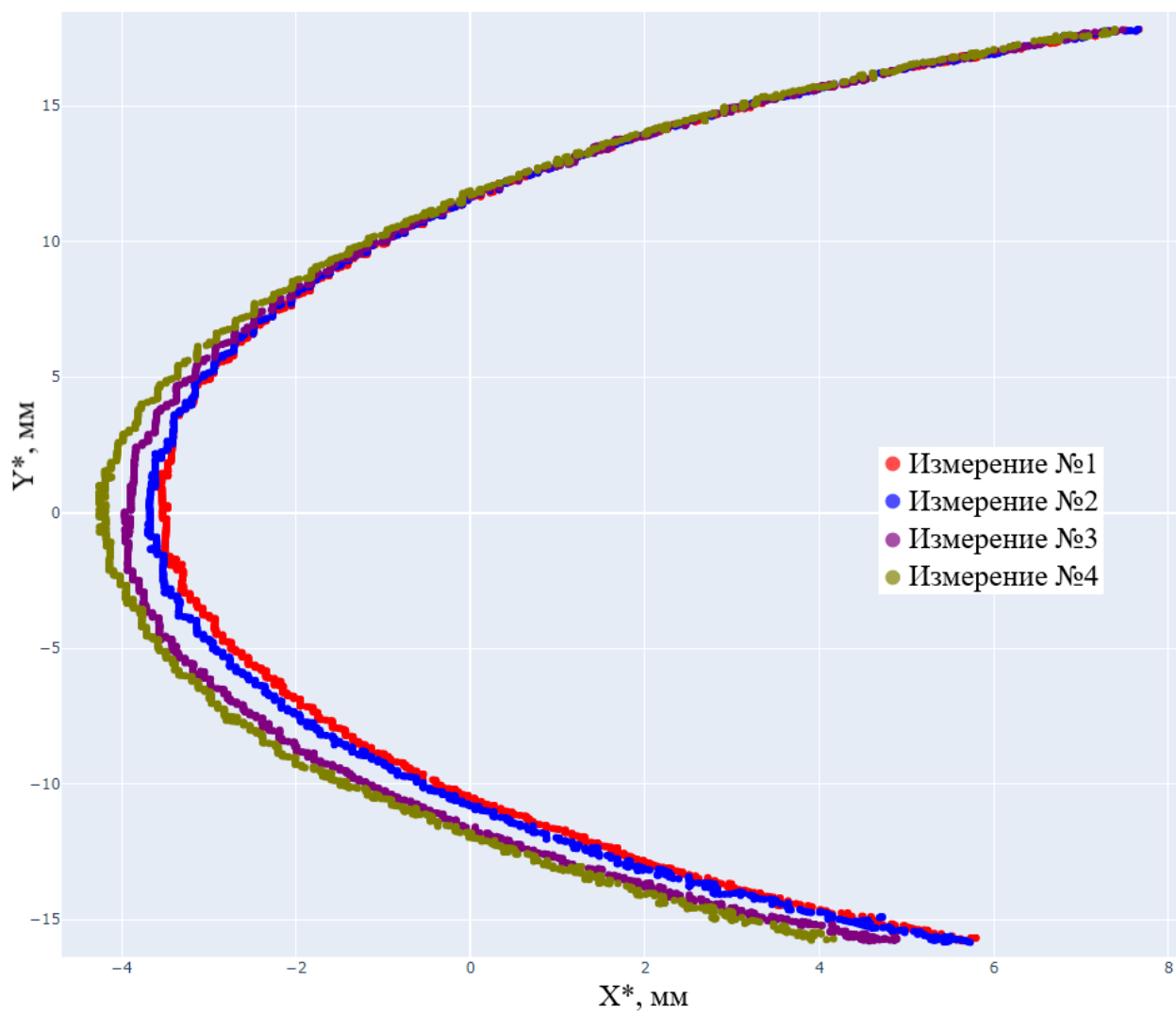


Рис. 4.21. Анализ изменения трехмерной геометрии наледи типа «glaze» в динамике в установленном плоском срезе.

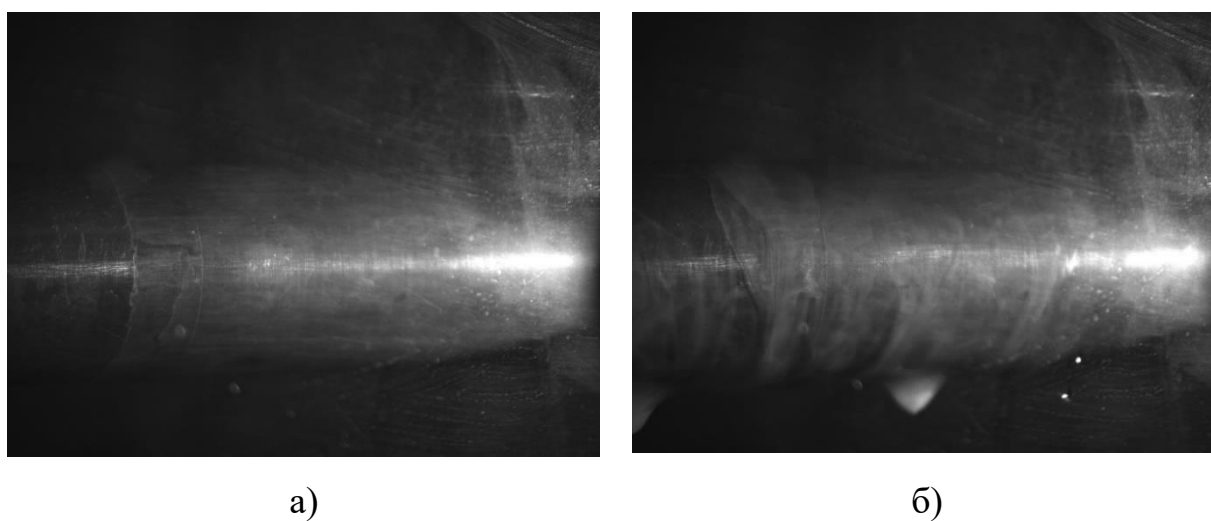


Рис. 4.22. Объект цилиндрической формы до (а) и после (б) обледенения типа «glaze».

Для контроля трехмерной геометрии наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением обеспечена возможность оптической триангуляции исследуемого объекта несколькими измерительными модулями (рис. 3.10) с адаптированными оптическими схемами и измерительными объемами, пересекающимися в пространстве. Показана возможность одновременного контроля трехмерной геометрии наледи как на всей контролируемой поверхности, так и на локальном участке с повышенным пространственным разрешением. Результаты трехмерных измерений (рис. 4.23, 4.24) наглядно демонстрируют кардинальное улучшение информативности регистрируемых данных о процессе обледенения с помощью применения разработанной адаптивной, многомодульной триангуляционной системы.

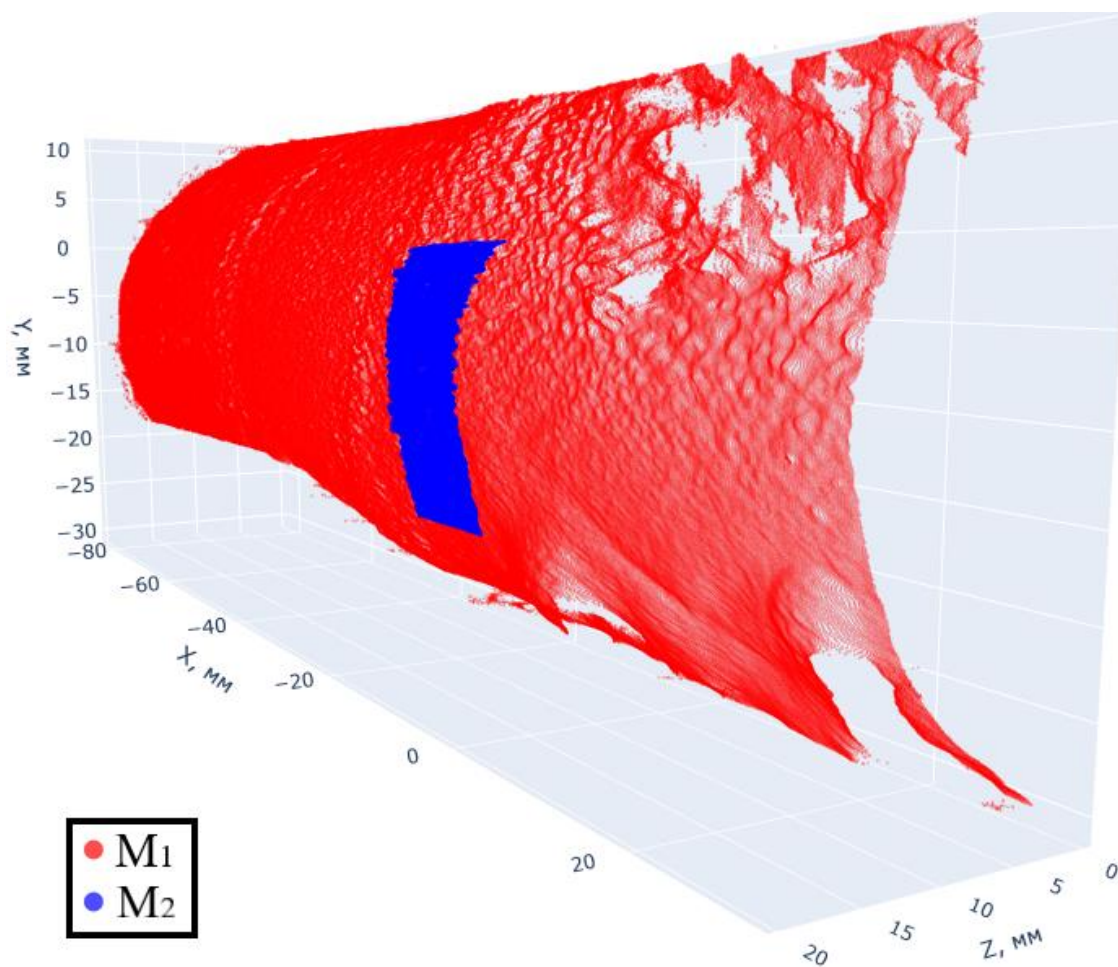


Рис. 4.23. Измерения трехмерной геометрии наледи триангуляционными модулями: M_1 и M_2 – с повышенным пространственным разрешением.

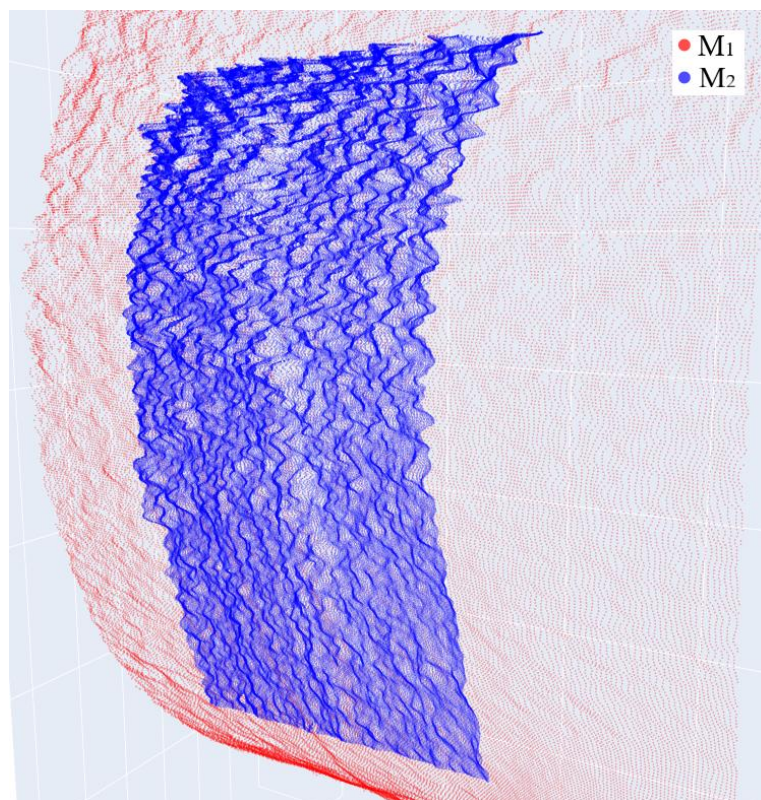


Рис. 4.24. Измерения трехмерной геометрии локального участка поверхности наледи триангуляционными модулями: M_1 и M_2 – с повышенным пространственным разрешением.

Результаты производственных испытаний разработанных адаптивных триангуляционных систем на действующих аэродинамических, климатическом и силовом экспериментальных стендах подтвердили корректность их работы и практическую значимость в актуальных научно-технических задачах машиностроения и энергетики.

4.3. Выводы по главе 4

1) Экспериментально установлено, что использование метода фазовой триангуляции с адаптивной компенсацией нелинейности приемно-передаточной функции в условиях ограниченного динамического диапазона оптической системы обеспечивает возможность контроля трехмерной геометрии непрозрачных объектов с погрешностью на уровне 0.02 % от глубины измерительного объема.

2) Показано, что применение адаптивного метода оптической триангуляции на основе пространственно-временной модуляции интенсивности в виде динамического светового сечения обеспечивает возможность контроля трехмерной геометрии светопреломляющих поверхностей с погрешностью на уровне 0.07 % от глубины измерительного объема.

3) Подтверждена возможность дистанционного контроля трехмерных деформаций объектов с оптическими свойствами в широком диапазоне с адаптивным локальным пространственным разрешением с помощью разработанных триангуляционных методов и систем.

Заклучение

1) Предложены и реализованы новые методы оптической триангуляции с адаптивной компенсацией нелинейности приемно-передаточной функции и декомпозицией регистрируемого сигнала от аддитивного светового потока для прецизионного контроля трехмерной геометрии непрозрачных и светопреломляющих поверхностей в условиях динамического изменения их светорассеивающих свойств.

2) Разработаны и внедрены новые методы автоматизированной калибровки триангуляционных систем с регрессионным и дифференциальным анализом фазовых распределений для высокоинформативного контроля трехмерной геометрии объектов с адаптивным пространственным разрешением в условиях нелинейных оптических искажений.

3) Создан и апробирован адаптивный к текстуре поверхности комплекс методов контроля трехмерных деформаций объектов на основе обработки данных оптической триангуляции с помощью пространственно-временного корреляционного анализа и многопараметрического восстановления полигональной поверхности.

4) На основе проведенных исследований впервые создан ряд адаптивных систем оптической триангуляции непрозрачных и светопреломляющих поверхностей с погрешностью контроля геометрии на уровне 0.07 % от глубины измерительного объема, успешно прошедших лабораторные и промышленные испытания и получивших практическое применение на действующих аэродинамических, климатическом и силовом экспериментальных стендах в задачах машиностроения и энергетики.

В диссертации поставлена, обоснована и решена важная научно-техническая проблема разработки и практической реализации методов оптической триангуляции, адаптивных к светорассеивающим свойствам

поверхности и нелинейным искажениям, для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в процессе деформации. Внедрение новых научно обоснованных технических решений, изложенных в диссертации, способно внести значительный вклад в развитие отечественного приборостроения, машиностроения и энергетики, существенно повысив информативность и эффективность технологических процессов.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю благодарность научному руководителю, заведующему лабораторией 6.4 ИТ СО РАН, д.т.н. Двойнишникову С.В. за всестороннюю помощь и внимание, оказанные при выполнении настоящей работы, а также научным сотрудникам, инженеру и конструкторам: к.т.н. Бакакину Г.В., к.т.н. Рахманову В.В., к.т.н. Кабардину И.К., Павлову В.А., Крапивко Е.А. и Ягофарову О.А., принимавших активное участие при выполнении отдельных этапов работы. Автор также считает необходимым выразить признательность главному научному сотруднику лаборатории 6.4 ИТ СО РАН, д.т.н. Меледину В.Г. за полезные обсуждения содержания работы.

Список использованных источников

- 1) Li F., Hu J., Zhang S., Hu Y., Xia C., Hao Q. Fast fringe projection profilometry using 3 + 1 phase retrieval strategy and fringe order correction // Applied Optics. – 2023. – Vol. 62. – P. 348-356.
- 2) Zhang S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: A review // Optics and lasers in engineering. – 2018. – Vol. 107. – P. 28-37.
- 3) Miramon H., Sarlin W., Huerre A., Cobelli P., Seon T., Josserand C. Free surface topography of capillary flows using spatiotemporal phase shifting profilometry // Experiments in Fluids. – 2025. – Vol. 66. – № 89.
- 4) Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Главный В.Г., Наумов И.В., Чубов А.С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерительная техника. – 2015. – №5. – С.24-27.
- 5) Южина Т.Н. Высокоскоростное деформирование и разрушение некоторых пород древесины: дисс. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Южина Т.Н. – ННГУ., Нижний Новгород., 2022. – 163 с.
- 6) Федоров А.Е., Самарцев В.А., Гаврилов В.А., Вильдеман В.Э., Словиков С.В. Экспериментальное исследование механических свойств современных хирургических рассасывающихся шовных материалов // Российский журнал биомеханики. – 2009. – Т. 13. – № 4. – С. 78-84.
- 7) Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Экспериментальные исследования влияния повышенных и высоких температур на прочностные и деформационные свойства комбинированных стеклоорганопластиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 1. – С. 104-117.
- 8) Шершак П.В., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. Применение оптических датчиков деформации для оценки деформативности образцов из полимерных композиционных материалов вблизи концентраторов напряжений // Труды ВИАМ. – 2022. – Т. 107. – № 1. – С. 111-122.

9) Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С., Чеботарева Е.А. Экспериментальное изучение предельных деформаций и разрушение стеклопластиков с концентраторами напряжений // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2024. – № 4. – С. 98-112.

10) Старовойтов Е.И., Савчук Д.В. Методы математического моделирования в проектировании бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Радиостроение. – 2021. – № 3. – С. 13-35.

11) Pogacnik L., Munih M. Towards a multi-perspective time of flight laser ranging device based on mirrors and prisms // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – № 14. – P. 7121.

12) Малмыгин Я.С., Гусева А.Е., Гриднев С.О. Создание фазового лазерного дальномера на российской элементной базе // Известия ТулГУ. – 2023. – № 5. – С. 253-259.

13) Ma L., Zhu J., Yang L., Gao N., Meng Z., Ni Y., Zhang Z. Review of in-motion extended-range 3D optical measurement for industrial applications // Opto-Electronics Plus. – 2025. – Vol. 1. – № 3. – P. 250015.

14) Добдин С.Ю., Джафаров А.В., Щедринов М.П., Инкин М.Г., Скрипаль Ан.В. Измерения наносмещений частотно-модулированным лазерным автодином // Известия Саратовского университета. – 2021. – Т. 21. – № 2. С. 157-164.

15) Huang X., Hong Y., Li Z.P., Xu F. Frequency-modulated continuous-wave 3D imaging with high photon efficiency // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47. – № 14. – P. 3568-3571.

16) Осинцев А.В., Очков К.Ю. Визуализация перемещений и деформаций методом цифровой корреляции изображений // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 15-23.

17) Souto Janeiro A., Fernandez Lopez A., Chimeno Manguan M., Perez-Merino P. Three-dimensional digital image correlation based on speckle pattern projection for non-invasive vibrational analysis // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 24. – P. 9766.

18) Bi Q., Lai M., Yu J., Tang Z., Teng X., Lu Y., Zou J. Method for detecting surface defects of underwater buildings: Binocular vision based on sinusoidal grating fringe assistance // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – Vol. 78. – P. 120-130.

19) Чертов А.Н., Хохлов Д.Д. Современные оптические методы бесконтактных геометрических измерений и восстановления 3D-формы поверхности объектов: обзор // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2024. – Т. 24 – № 6. – С. 923-935.

20) Baqersad J., Poozesh P., Niezrecki C., Avitabile P. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Vol. 86. – P. 17-34.

21) Yao R., Wang B., Hu M., Hua D., Wu L., Lu H., Liu X. A method for extracting a laser center line based on an improved grayscale center of gravity method: application on the 3D reconstruction of battery film defects // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 17. – P. 9831.

22) Palomer A., Ridaou P., Youakim D., Ribas D., Forest J., Petillot Y. 3D laser scanner for underwater manipulation // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – № 4. – P. 1086.

23) Sardemann H., Mulsow C., Maas H.G. Strict geometric calibration of an underwater laser triangulation system // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2021. – Vol. 43. – P. 689-692.

24) Sardemann H., Mulsow C., Maas H.G. Accuracy analysis of an oblique underwater laser lightsheet triangulation system // PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. – 2022. – Vol. 90. – P. 3-18.

25) Meana V., Zapico P., Cuesta E., Giganto S., Martinez-Pellitero S. Laser triangulation sensors performance in scanning different materials and finishes // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – № 8. – P. 2410.

26) Yang Y., Liu Y., Rigall E., Yin Y., Zhang S., Dong J. Underwater target 3D reconstruction via integrated laser triangulation and multispectral photometric stereo // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13. – № 5. – P. 840.

27) Dizeu F.D., Rivard M., Boisvert J., Lamouche G. Comparison of laser triangulation, phase shift triangulation and swept source optical coherence Tomography for nondestructive inspection of objects with micrometric accuracy // AIP Conference Proceedings. – AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2102. – № 1.

28) Gao L., Veerakumar R., Liu Y., Hu H. Quantification of the 3D shapes of the ice structures accreted on a wind turbine airfoil model // Journal of visualization. – 2019. – Vol. 22. – P. 661-667.

29) Chen C., Wang H., Zhang Z., Gao F. Three-dimensional reconstruction from a fringe projection system through a planar transparent medium // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – № 19. – P. 34824-34834.

30) Narasimhan S.G., Nayar S.K. Structured light methods for underwater imaging: light stripe scanning and photometric stereo // Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. – 2005. – P. 2610-2617.

31) Zhang K., Wei T., Hu H. An experimental investigation on the surface water transport process over an airfoil by using a digital image projection technique // Experiments in Fluids. – 2015. – Vol. 56. – № 173.

32) Zoraja D., Petkovic T., Forest J., Pribanic T. Calibration of a structured light imaging system in two-layer flat refractive geometry for underwater imaging // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – № 12. – P. 5444.

33) Hu K., Wang T., Shen C., Weng C., Zhou F., Xia M., Weng L. Overview of underwater 3D reconstruction technology based on optical images // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 949.

34) Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля

поверхности крупногабаритных объектов сложной формы //Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 17-21.

35) Yang T., Gu F. Overview of modulation techniques for spatially structured-light 3D imaging // Optics & Laser Technology. – 2024. – Vol. 169. – P. 110037.

36) Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial // Advances in optics and photonics. – 2011. – Vol. 3. – № 2. – P. 128-160.

37) Li Y., Wang Z. 3D reconstruction with single-shot structured light RGB line pattern // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 14. – P. 4819.

38) Vargas R., Romero L.A., Zhang S., Marrugo A.G. Calibration method based on virtual phase-to-coordinate mapping with linear correction function for structured light system // Optics and Lasers in Engineering. – 2024. – Vol. 183. – P. 108496.

39) Zuo C., Feng S., Huang L., Tao T., Yin W., Chen Q. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review // Optics and lasers in engineering. – 2018 – Vol. 109. – P. 23-59.

40) Lv S., Jiang M., Su C., Zhang L., Zhang F., Sui Q., Jia L. Phase demodulation method for fringe projection measurement based on improved variable-frequency coded patterns // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 13. – P. 4463.

41) Alkhatib M.N., Shmelev Y.D., Tyshova O.A., Sinilshchikov I.V., Bobkov A.V. 3D measurement using fringe projection profilometry // Computer optics – 2023. – Vol. 47. – № 6. – P. 913-919.

42) Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Кабардин И.К., Рахманов В.В., Зуев В.О. Метод фазовой триангуляции со статистической фильтрацией для измерений в условиях случайных аддитивных помех и ограниченного динамического диапазона фотоприёмника // Измерительная техника. – 2022. – № 6. – С. 36-40.

43) Chen Y., Kema Q. Phase-shifting algorithms with known and unknown phase shifts: comparison and hybrid // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – № 5. – P. 8275-8302.

44) Zhang H., Zhou J., Jia D., Huang J., Yuan J. Two-plus-two fringe projection profilometry based on phase-shifted coding // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – P. 21768.

45) Zhang Q., Liu F., Lu L., Su Z., Pan W., Dai X. Reconstruction of transparent objects using phase shifting profilometry based on diffusion models // Optics Express. – 2024. – Vol. 32. – № 8. – P. 13342-13356.

46) Castillo-Salazar J.O., Pedraza-Ortega J.C., Espinosa-Bernal O.A., Tovar-Arriaga S., Aceves-Fernandez M.A. Color phase shifting profilometry using multi-frequency temporal phase unwrapping // Telematics and Computing. WITCOM 2024. Communications in Computer and Information Science. – 2024. – Vol. 2249. – P. 52-64.

47) Двойнишников С.В. Разработка оптоэлектронных систем для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.07. – Сиб. гос. геодез. акад. – Новосибирск. – 2009. – 131 с.

48) Dong G., Sun X., Kong L., Peng X. Suppression for phase error of fringe projection profilometry using outlier-detection model: development of an easy and accurate method for measurement // Photonics. – 2023. – Vol. 10. – № 11. – P. 1252.

49) Wang L., Zhang Y., Yi L., Hao X., Wang M., Wang X. Active projection nonlinear γ correction method for fringe projection profilometry // Journal of the Optical Society of America A. – 2022. – Vol. 39. – № 11. – P. 1983-1991.

50) Wang J., Wu Z., Huang Y., Yue H., Liu Y. A rapid and accurate gamma compensation method based on double response curve fitting for high-quality fringe pattern generation // Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 160. – P. 109084.

51) Sun X., Zhang Y., Kong L., Peng X., Luo Z., Shi J., Tian L. Multi-color channel gamma correction in fringe projection profilometry // Photonics. – 2025. – Vol. 12. – № 1.

52) Cai B., Tong C., Wu Q., Chen X. Gamma error correction algorithm for phase shift profilometry based on polar angle average // Measurement. – 2023. – Vol. 217. – P. 113074.

53) Munoz A., Flores J.L., Parra-Escamilla G., Morales L.A., Ordonez S., Servin M. Least-squares gamma estimation in fringe projection profilometry // Applied Optics – 2021. – Vol. 60. – № 5. – P. 1137-1142.

54) Chen C., Gao N., Wang X., Zhang Z., Gao F., Jiang X. Generic exponential fringe model for alleviating phase error in phase measuring profilometry // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Vol. 110. – P. 179-185.

55) Двойнишников С. В., Бакакин Г. В., Павлов В. А., Меледин В. Г. Быстрый алгоритм расшифровки изображения объекта в структурированном свете для измерения трёхмерного профиля в условиях нелинейности оптического тракта // Измерительная техника. – 2023. – № 8. – С. 36-41.

56) Sanchez-Torres M., Hernandez-Capuchin I., Ramirez-Fernandez C., Clemente E., Sanchez-Gonzalez J.L.J., Lopez-Martinez A. Recent advances in digital fringe projection profilometry (2022–2025): techniques, applications, and metrological challenges – a review // Metrology. – 2026. – Vol. 6. – № 1. – P. 3.

57) Zhang S., Yau S. T. High dynamic range scanning technique // Optical Engineering. – 2009. – Vol. 48. – № 3.

58) Tang P., Sa G., Liu Z., Tan J. Quasi-phase-shifting relationship-based multi-exposure fusion method for high dynamic range fringe projection profilometry // 5th International Conference on Laser, Optics, and Optoelectronic Technology. – 2025. – Vol. 13694.

59) Xiang S., Huang Z., Deng H., Wu J., Yang Y., Yu L. Adaptive pattern fusion for multi-reflectivity objects in fringe projection profilometry // Optics and Lasers in Engineering. – 2024. – Vol. 174. – P. 107978.

60) Jiang H., Zhao H., Li X. High dynamic range fringe acquisition: a novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces // Optics and Lasers in Engineering. – 2012. – Vol. 50. – № 10. – P. 1484-1493.

61) Waddington C., Kofman J. Analysis of measurement sensitivity to illuminance and fringe-pattern gray levels for fringe-pattern projection adaptive to ambient lighting // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2010. – Vol. 48. – № 2. – P. 251-256.

62) Servin M., Garnica G., Estrada J.C., Quiroga A. Coherent digital demodulation of single-camera N-projections for 3D-object shape measurement: Co-phased profilometry // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – № 21. – P. 24873-24878.

63) Liu T., Li W., Tai M., Zhong Y. Three-dimensional measurement for specular reflection object based on adaptive fringe projection and phase measuring profilometry // *Results in Optics*. – 2023. – Vol. 12. – P. 100498.

64) Feng W., Tang S., Zhao X., Sun G., Zhao D. Adaptive fringe projection for 3D shape measurement with large reflectivity variations by using image fusion and predicted search // *International Journal of Optics*. – 2020. – № 1. – P. 4876876.

65) Lin H., Gao J., Mei Q., He Y., Liu J., Wang X. Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement // *Optics express*. – 2016. – Vol. 24. – № 7. – P. 7703-7718.

66) Гужов В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 82 с.

67) Ma M., Qin F., Jia Y., Liu L., Zhong X., Deng H., Gong X., Wang Z. High dynamic range fringe projection profilometry with binary fringes differencing demodulation // *Optics Express*. – 2025. – Vol. 33. – № 5. – P. 10965-10980.

68) Li X., Yang K., Wan Y., Bai Z., Liu Y., Wang Y., Xie L. Three-dimensional reconstruction based on binocular structured light with an error point filtering strategy // *Optical Engineering*. – 2024. – Vol. 63. – № 3.

69) Eren G., Aubreton O., Meriaudeau F., Sanchez Secades L.A., Fofi D., Naskali A.T., Truchetet F., Ercil A. A 3D scanner for transparent glass // *Image*

Analysis and Processing. ICIAP 2009. Lecture Notes in Computer Science. – 2009. Vol. 5716. – P. 519-527.

70) Wiedenmann E., Afrough M., Albert S., Schott R., Tusch J., Wolf A. Long wave infrared 3D scanner // Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications IV. – 2015. – Vol. 9489.

71) Eren G. 3D Scanning of Transparent objects. – Université de Bourgogne, 2010. – 168 p.

72) Brahm A., Robler C., Dietrich P., Heist S., Kuhmstedt P., Notni G. Non-destructive 3D shape measurement of transparent and black objects with thermal fringes // Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications V. – 2016. – Vol. 9868.

73) Speck H., Landmann M., Ramm R., Heist S., Kuhmstedt P., Notni G. Analysis of the measurement accuracy of a thermal 3D sensor for transparent objects // Measurement: Sensors. – 2025. – Vol. 38. – P. 101319.

74) Hullin M.B., Fuchs M., Ihrke I., Seidel H.P., Lensch H. Fluorescent immersion range scanning // ACM Transactions on Graphics. – 2008. – Vol. 27. – № 3. – P. 87:1-87:10.

75) Ikeuchi K., Matsushita Y., Sagawa R., Kawasaki H., Mukaigawa Y., Furukawa R., Miyazaki D. Active lighting and its application for computer vision. Other shape reconstruction techniques // Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. – 2020. – P. 157-182.

76) Hata S., Saitoh Y., Kumamura S., Kaida K.I. Shape extraction of transparent object using genetic algorithm // Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition. – 1996. – Vol. 4. – P. 684-688.

77) He K., Sui C., Huang T., Dai R., Lyu C., Liu Y.H. 3D Surface reconstruction of transparent objects using laser scanning with LTFtF method // Optics and Lasers in Engineering. – 2022. – Vol. 148. – P. 106774.

78) Karami A., Battisti R., Menna F., Remondino F. 3D digitization of transparent and glass surfaces: State of the art and analysis of some methods // The

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2022. – P. 695-702.

79) Zhang C., Liu C., Xu Z. High-accuracy three-dimensional deformation measurement system based on fringe projection and speckle correlation // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 2. – P. 680.

80) Sun W., Xu Z., Li X., Chen Z., Tang X. Three-dimensional shape and deformation measurements based on fringe projection profilometry and fluorescent digital image correlation via a 3 charge coupled device camera // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 15. – P. 6663.

81) Zhu Z., Zhu T., Long W., He L., Qiu H., Zhou L. Three-dimensional displacement measurement based on DIC-assisted polarization fringe projection // *Optics Communications*. – 2025. – Vol. 576. – P. 131347.

82) Hong D., Lee H., Kim M.Y., Cho H., Moon J.I. Sensor fusion of phase measuring profilometry and stereo vision for three-dimensional inspection of electronic components assembled on printed circuit boards // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48. – № 21. – P. 4158–4169.

83) Rahman A.A.R.M.A., Mousavi A. A review and analysis of automatic optical inspection and quality monitoring methods in electronics industry // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 183192-183271.

84) Wang B., Chen W., Qian J., Feng S., Chen Q., Zuo C. Single-shot super-resolved fringe projection profilometry (SSSR-FPP): 100,000 frames-per-second 3D imaging with deep learning // *Light: Science & Applications*. – 2025. – Vol. 14.

85) Hu G., Wang J., Deng H., Ma M., Zhong X. Non-contact global measurement of the engine in working condition // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – № 7. – P. 801.

86) Рябинина О.А., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Левин Д.Ю. Применение технологии трехмерного сканирования для создания цифровых двойников станочного оборудования // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2024. – Т. 20. – № 2. – С. 199-206.

87) Sa G., Chao Y., Li S., Liu D., Wang Z. A Globally consistent merging method for house point clouds based on artificially enhanced features // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13. – № 16.

88) Feng S., Zuo C., Zhang L., Tao T., Hu Y., Yin W., Qian J., Chen Q. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review // *Optics and lasers in engineering*. – 2021. – Vol. 143. – P. 106622.

89) Zhang G., Liu Y., Yao Q., Deng H., Zhao H., Zhang Z., Yang S. Multi-view fringe projection profilometry for surfaces with intricate structures and high dynamic range // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32. – № 11. – P. 19146-19162.

90) Gai S., Da F., Tang M. A flexible multi-view calibration and 3D measurement method based on digital fringe projection // *Measurement Science and Technology*. – 2019. – Vol. 30. – № 2. – P. 025203.

91) Guo J., Peng X., Li A., Liu X., Yu J. Automatic and rapid whole-body 3D shape measurement based on multinode 3D sensing and speckle projection // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – № 31. – P. 8759-8768.

92) Liu X., Peng X., Chen H., He D., Gao B.Z. Strategy for automatic and complete three-dimensional optical digitization // *Optics letters*. – 2012. – Vol. 37. – № 15. – P. 3126-3128.

93) Lv S., Sun Q., Zhang Y., Jiang Y., Yang J., Liu J., Wang J. Projector distortion correction in 3D shape measurement using a structured-light system by deep neural networks // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 45. – № 1. – P. 204-207.

94) Berger M., Tagliasacchi A., Seversky L., Alliez P., Levine J., Sharf A., Silva C. State of the art in surface reconstruction from point clouds // *Eurographics 2014-State of the Art Reports*. – 2014. – P. 161–185.

95) Сорокин М.И., Жданов Д.Д., Жданов А.Д. Создание полигональных сеток из облаков точек с помощью глубокого обучения для их визуализации в системах смешанной реальности // *Графикон*. – 2023. – С. 43-52.

96) Дьяченко Р.А., Саввиди К.Л., Гура Д.А. Обоснование выбора модели восстановления нормалей для построения трехмерной сеточной

поверхности // Программные продукты и системы. – 2025. – Т. 38. – № 2. – С. 315-324.

97) Сорокин М.И., Жданов Д.Д., Жданов А.Д. Преобразование данных облака точек в 3D-модели с помощью PointNet++ и Transformer // Программирование. – 2024. – № 3. – С. 33-41.

98) Huang Z., Wen Y., Wang Z., Ren J., Jia K. Surface reconstruction from point clouds: a survey and a benchmark // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2024. – Vol. 46. – № 12. – P. 9727 - 9748.

99) Zhang Q., Xiong C. A new chessboard corner detection algorithm with simple thresholding // Intelligent Robotics and Applications. – 2017. – P. 532-542.

100) Dan X., Gong Q., Zhang M., Li T., Li G., Wang Y. Chessboard corner detection based on EDLines algorithm // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 9 – P. 3398.

101) Liu Y., Liu S., Cao Y., Wang Z. Automatic chessboard corner detection method // IET Image Processing. – 2016. – Vol. 10.

102) Wang G., Zheng H., Zhang X. A robust checkerboard corner detection method for camera calibration based on improved YOLOX // Frontiers in Physics. – 2022. – Vol. 9. – P. 819019.

103) Zuo Z., Wu Z., Wei J., Wu P., Huang S., Cheng Z. A checkerboard corner detection method for infrared thermal camera calibration based on physics-informed neural network // Photonics. – 2025. – Vol. 12. – № 9. – P. 847.

104) Arun K.S., Huang T.S., Blostein S.D. Least-squares fitting of two 3-D point sets // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1987. – № 5. – P. 698–700.

105) Wen G., Wang Z., Xia S., Zhu D. Least-squares fitting of multiple M-dimensional point sets // The Visual Computer. – 2006. – Vol. 22. – P. 387-398.

Приложение. Справки об использовании результатов работы

ООО «Сигма-Про»
Российская Федерация, 630090,
г. Новосибирск,
ул. Инженерная, д.28
тел/факс: +7(383)3732192, (383)3732197
ИНН 5408254924, КПП 540801001
ОГРН 1075473012614, ОКПО.822.90654

СПРАВКА

о практическом использовании результатов работы
Зуева Владислава Олеговича в разработке
автономной системы измерения деформация

Автономная система измерения деформаций предназначена для микро- и макромасштабной диагностики и анализа полей деформации, при статическом нагружении простейших образцов на растяжение/сжатие и образцов со сложным напряженно-деформированным состоянием. Система состоит из двух оптико-электронных модулей для микро- и макро-измерений, системы крепежа и позиционирования, соединительных кабелей и персонального компьютера

Принцип измерения основан на изменении трехмерного профиля поверхности. Деформации рассматриваются, как изменение трехмерного профиля. Принцип измерения трехмерного профиля основан на формировании в измерительном объеме структурированной засветки и наблюдении фотоприемником с направления, отличного от направления освещения. Наблюдаемые искажения структурированной засветки кодируют информацию о дальности до объекта.

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Зуева Владислава Олеговича использованы в разработке автономной системы измерения деформаций.

директор ООО «Сигма-Про»  К.А.Амосов



WWW.POLIS-INSTRUMENTS.RU

630090, г. Новосибирск, ул. Инженерная 28
E-mail: info@polis-instruments.ru
Тел.: +7 (383) 373-21-97, 373-21-92

 **ПОЛИС**
ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ

ООО "Лазерные измерительные
системы и технологии(ООО "ЛИСТ")
630559, Новосибирская область, рп
Кольцово, Олимпийская ул., д. 13
Тел.+7 913-398-8424
Эл. почта: i913@yandex.ru

Исх.№ 1/01-2025 от 20.01.2025 г.

Новосибирская область, рп Кольцово

СПРАВКА

О внедрении результатов научной работы
Зуева Владислава Олеговича в деятельность ООО «ЛИСТ»

Настоящая справка подтверждает, что в целях повышения метрологических характеристик и расширения функциональных возможностей оптико-электронного измерителя профиля поверхности 3D-СТАТИК, в его программном обеспечении применены результаты научно-исследовательской работы Зуева Владислава Олеговича.

Измерители профиля поверхности 3D-СТАТИК используются для высокоточных бесконтактных измерений трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов в научных исследованиях и промышленных технологиях.

Результатом внедрения научно-исследовательской работы Зуева Владислава Олеговича является повышение качества калибровки измерителя, увеличение точности измерений и расширение спектра возможных применений.

Директор ООО «ЛИСТ»



Белогривцева Ю.И.



**УРАН
ӨНДІРІСІ**

**УРАНОВОЕ
ПРОИЗВОДСТВО**

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по подготовке производства

Мозговой Е.Н. Мозговой
« 11 » 10 2024 г.



11.10.2024 АКТ № 46-01-14/4127

**о практическом использовании результатов работы
в разработке "Линия автоматизированного контроля
внешнего вида и геометрических размеров топливных
таблеток с укладкой на паллеты ЛАД-0Т1"**

В рамках работ по разработке Линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток с укладкой на паллеты ЛАД-0Т1 в период 2023 – 2024 гг. выполнена доработка и пуско-наладка системы технического зрения Линии, выполняющей измерение геометрических размеров и контроль внешнего вида топливных таблеток на основе методов многоканальной синхронной оптической фотометрии с адаптивной многоуровневой пространственной, спектральной и цифровой фильтрацией.

Система технического зрения в составе Линии ЛАД-0Т1 успешно прошла метрологическую аттестацию. По итогам проведенных испытаний и комплексного опробования Линия автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток с укладкой на паллеты ЛАД-0Т1 принята в промышленную эксплуатацию.

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы Зуева Владислава Олеговича использованы в разработке системы технического зрения Линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток с укладкой на паллеты ЛАД-0Т1, которая принята в промышленную эксплуатацию 29.08.2024 г. в цехе «Р» уранового производства АО «УМЗ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

Начальник отделения
по производству таблеток цеха «Р»

В.В. Когай