

*На правах рукописи*



Шадрин Максим Владимирович

**Лазерный триангуляционный 3D метод и установка  
для прототипирования и изготовления сложных изделий**

Специальность 01.04.01 –  
Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань, 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина».

**Научный руководитель**

**Степанов Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики и МПФ, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»

**Официальные оппоненты:**

**Привалов Вадим Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры экспериментальной физики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

**Серебряков Андрей Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

**Ведущая организация:**

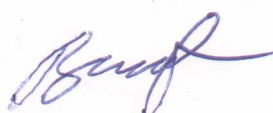
АО «Плазма», г. Рязань

Защита диссертации состоится «06» октября 2020 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1 и на сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.211.03, к.ф.-м.н., доцент



В.Г. Литвинов

**Актуальность темы исследования.** Необходимость качественного, быстрого и автоматического контроля производимых изделий, *получения трехмерных копий реального объекта для целей обратного инжиниринга и прототипирования* обусловила развитие и широкое внедрение оптических методов контроля.

На данный момент оптические методы контроля существенно превосходят по удобству, быстродействию и гибкости измерительного диапазона контактные методы. Бесконтактные оптические методы оцифровки объектов широко применяются в автомобиле- и авиастроении, в обрабатывающей промышленности при контроле геометрических параметров производимых изделий; строительных материалов и т.д.

Существует несколько основных методов оптического сканирования – теневой, интерференционный, времяпролетный, фотограмметрический и триангуляционный. Теневой метод использует принцип дифракции Фраунгофера и имеет невысокую точность. Интерференционные методы имеют, как правило, высокую точность, но небольшой диапазон измерения и низкую скорость сканирования. Времяпролетные методы получили в настоящее время широкое распространение благодаря развитию высокоточной электроники, способной измерять сверхкороткие временные интервалы. Данный способ имеет большие диапазоны измерения и высокую скорость сканирования, однако низкая точность не позволяет применять данный метод для прецизионных измерений с высоким разрешением. Одним из первых методов, использующих модель камеры-обскуры, является фотограмметрический метод. Он имеет высокую скорость сканирования, относительно большой диапазон, но, однако, невысокую точность.

Переход в метрологии от 2D-измерений к 3D-анализу требует новых современных подходов к контролю измерений. Появилась необходимость быстрого и точного бесконтактного контроля геометрии сложных изделий в условиях цеха.

Сегодня не существует ни одного датчика, способного измерять объект размером в десятки мм с точностью доли мкм. На немногочисленных российских контактных КИМ работают сенсоры зарубежного производства.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получил метод оптической (лазерной) триангуляции, сочетающей в себе высокую скорость оцифровки объектов, большой диапазон измерения и высокую точность. Поэтому *объектом исследования* в данной работе является **метод лазерной триангуляции**.

Принцип лазерной триангуляции заключается в изменении положения изображения отраженного лазерного сигнала на фотосенсоре при изменении расстояния до наблюдаемой точки объекта. При этом оси лазерного излучателя и фотосенсора образуют некоторый угол – угол триангуляции, от которого зависит рабочий диапазон, точность, разрешение сканирования и наличие или отсутствие «слепых зон».

Особое место для достижения высокой точности лазерных триангуляционных измерителей занимает калибровка. Калибровка позволяет компенсировать технологические изъяны конструкции, компенсировать

искажения, вносимые оптической системой сканера; учесть неравномерность и нелинейность лазерного излучения; позволяет соотнести координаты объектов в реальном мире с их изображением на фотосенсоре сканера. Калибровка для точечных триангуляционных сканеров не вызывает сложности, в отличие от сканеров, имеющих линейный структурированный подсвет. В настоящее время данная задача часто решается благодаря плоским и объемным шаблонам, например, объект с треугольными зубьями. В данном случае геометрические характеристики зубьев шаблона известны заранее с высокой точностью. Данный метод прост в использовании, но имеет ряд недостатков: точность по глубине зависит от количества расстояний, на котором производится калибровка; от алгоритмов аппроксимации для значений, лежащих между значениями в таблице; от точности нахождения углов решетки; алгоритм вынужден работать с огромными массивами данных в табличной форме (гиперкуб данных, имеющих три измерения).

**Целью диссертационной работы** является разработка метода измерений и устройства 3D лазерной триангуляции и вычисления координат объекта без использования таблиц и 3D-шаблонов для решения задач прототипирования и обратного (реверсивного) инжиниринга сложных изделий в машиностроении и других областях науки и техники.

Для достижения этой цели ставились следующие **задачи**:

1. Изучение математического аппарата модели камеры-обскуры;
2. Получение параметров внутренней калибровки камеры по методу Чанга;
3. Разработка методов нахождения основных параметров устройства 3D-лазерной триангуляции: угла триангуляции и базового расстояния (расстояния между центром оптической оси и источником лазерного зондирующего излучения);
4. Разработка метода вычисления расстояния до объекта по оси Z (по глубине);
5. Вычисление координаты Y – высоты объекта до основы модели камеры-обскуры.
6. Вычисление координат – как функции перемещения по оси фрезерного станка с ЧПУ или координатно-измерительной машины;
7. Создание 3D лазерного триангуляционного сканера и разработка алгоритма, обеспечивающих измерение формы, микротопологии и шероховатости сложных изделий в условиях производства;
8. Сравнение отсканированных моделей с эталонами и реальными объектами.
9. Получение и использование компьютерных моделей реальных сложных объектов.
10. Организация обратного (реверсивного) инжиниринга на объектах машиностроения и электроники

**Методы исследования.** Анализ литературных источников по лазерной триангуляции, формирование изображения объекта на фотосенсоре на основе законов оптики, численная обработка сигнала с фотосенсора, моделирование электронного (цифрового) образа реального объекта.

### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Оптическая схема и макет лазерного ортогонального триангуляционного сканера обеспечивает получение 3D цифровых изображений (копий) многообразных металлических композиционных, оптических, электровакуумных и других изделий с точностью до 10 мкм.
2. Оптическая схема и макет 5-осевой контрольно-измерительной установки с ортогональным лазерным триангуляционным сканером обеспечивают получение высокоточных САД моделей, контроль и изготовление сложных 3D изделий размером до 200 см<sup>3</sup>.
3. Использование алгоритма, основанного на итерационном методе устранения влияния глубоких впадин и гранул, обеспечивает точное (до 0,5 мм) определение волнистости, шероховатости и текстурированности поверхности рубероида.

### **Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Проанализированы и определены факторы, влияющие на точность метода лазерной триангуляции при 3D-сканировании. Определены зависимости влияния размеров, форм и цвета распределения интенсивности пятна зондирующего лазерного излучения от шероховатости, отражательной способности поверхности, поляризации и микротопологических неровностей, которые представляют собой множество беспорядочно ориентированных микрозеркал.
2. Представлена разработанная модель камеры-обскуры для лазерного триангуляционного сканера.
3. Выявлены закономерности между фрактальностью поверхности различных материалов и точностью измерения толщины материала с присыпкой при лазерном сканировании.
4. Разработана модель и алгоритм формирования изображения линии проектируемой на объект и нахождения трехмерной координаты.
5. Разработан способ калибровки, позволяющий исключить использование шаблонов с треугольными зубьями и калибровочных таблиц.
6. Разработаны алгоритм и защищенное патентом устройство для контроля толщины кровельных материалов на движущемся конвейере с помощью лазерного триангуляционного точечного (6 шт.) сканера.
7. Разработаны защищенный патентом лазерный триангуляционный метод и устройство, позволяющие уменьшить влияние теневых эффектов при сканировании объектов со сложной поверхностью и эффективно сепарировать истинные сигналы от ложных за счет ортогонально расположенных фотосенсоров с точностью измерения от 10 мкм.
8. Разработан алгоритм пространственно-временной обработки, позволяющий восстановить истинную форму отраженного импульса на основе знания изменений формы импульса в пространстве и времени.
9. Разработана 5-осевая бесконтактная лазерная триангуляционная

мультисенсорная КИМ, обеспечивающая одновременное измерение формы, микротопологии и шероховатости сложной поверхности изделия.

10. На базе 5-осевой бесконтактной лазерной КИМ, оснащенной ортогональным триангуляционным 3D сканером реализованы: высокоточная и скоростная мультисенсорная технология и стратегия сканирования, обратный инжиниринг и контроль при изготовлении современного металлорежущего инструмента (фрезы, метчики и т.д.) и изделий (катодный узел) вакуумных металлокерамических дугогасительных камер (КДВ).

#### **Практическая значимость результатов**

1. Лазерная система измерения толщины кровельных материалов на основе лазерных триангуляционных профилометров на движущемся конвейере внедрена на производстве АО «Рязанский картонно-рубероидный завод», г. Рязань, ООО «Завод Шинглас», г. Рязань, ООО «Фибратек», г. Рязань, обеспечивая повышение производительности труда и снижение себестоимости изделия.

2. 5-осевая бесконтактная мультисенсорная лазерная КИМ и ортогональный 3D триангуляционный лазерный сканер внедрены на предприятии ООО «Проминструмент», г. Рязань, обеспечивая производство и качество современного металлорежущего инструмента на уровне зарубежных аналогов.

3. Разработанные и освоенные в производстве точечные, линейные и объемные (3D) ортогональные лазерные триангуляционные сканеры успешно используются в строительной, железнодорожной, машиностроительной и автомобильной отраслях промышленности, обеспечивая повышение производительности труда при изготовлении изделий.

4. Обратный (реверсивный) реинжиниринг внедрен при производстве металлорежущего инструмента на предприятии ООО «Проминструмент», металлокерамических дугогасительных камер на предприятии ООО «Вакуумные технологии» и в ПАО «Роснефть» для создания цифровых двойников нефтяного динамического оборудования (насосов и компрессоров) при решении задач импортозамещения выпускаемых изделий. Создана база данных 3D моделей высокоэффективного инструмента (более 300 чертежей – метчики, фрезы, сверла, токарные пластины и др.) для организации серийного производства (импортозамещение).

5. Разработанные на базе проведенных исследований аппаратура, технологическое оборудование и методические рекомендации успешно используются при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ студентов и аспирантов; чтении лекций бакалаврам и магистрам по курсам «Современные лазерные технологии» и «Современные промышленные технологии» в РГУ имени С.А. Есенина, обеспечивая высокий современный практико-ориентированный уровень образовательного процесса.

**Личный вклад автора.** Основные результаты исследований теоретических основ, моделей и алгоритмов, разработка оптических и электрических схем, методов и устройств лазерных триангуляционных 3D сканеров, 5-осевой КИМ, экспериментальные испытания их при изготовлении сложных изделий были выполнены автором.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики» по следующим пунктам паспорта специальности:

- п.2. Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений;
- п.5. Разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики;
- п. 8. Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов, моделирование физических явлений и процессов.

### **Апробация результатов исследования.**

Основные результаты настоящей работы докладывались на:

- Международном научном семинаре «Physic of Laser processed and application» (Рязань, 2012)
- II Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании» (Рязань, 2013)
- Международной научно-практической конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (Санкт-Петербург, 2013)
- III Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании» (Рязань, 2014)
- XXV Международной научно-практической конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (Новороссийск, 2017)
- XXVI Международной научно-практической конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (Новороссийск, 2018)
- XXVII Международной научно-практической конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (Новороссийск, 2019)

**Публикации.** Содержание диссертации отражено в 17 работах, включая 10 статей, 4 из которых – в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Получено 2 патента на изобретение.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Материал изложен на 182 страницах, включает 115 рисунков и схем, а также одно приложение. Список использованной информации содержит 149 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, задачи исследования и защищаемые положения и новые научные результаты.

**В первой главе** проведен обзор работ, описывающих факторы, влияющие на точность метода лазерной триангуляции; на факторы, ограничивающие их

возможности. Проанализированы роль и влияние 4-х типов факторов:

1. Конструкторские неточности изготовления и позиционирования элементов триангуляционного сканера, электрические шумы, нестабильность лазерного излучения, расфокусировки зондирующего излучения, ограниченная глубина резкости объектива и лазерного излучения, ошибка квантования АЦП/ЦАП, абберации оптической системы, методы калибровки, неправильно подобранные параметры базового расстояния и угла триангуляции для конкретных задач (приводит к появлению «слепых зон», падению разрешения сканирования), неправильно выставленные параметры времени экспозиции уровня сигнала на фотосенсоре;

2. Факторы, связанные с геометрическими особенностями и оптическими свойствами сканируемой поверхности. В данный пункт можно отнести алгоритмы предобработки видеосигнала с фотосенсора, т.к. на точность поиска центра изображения отраженного лазерного излучения (центроиду) влияет искажение индикатрисы рассеяния отраженного зондирующего излучения, вызванные специфическими параметрами отражения от сканируемой поверхности;

3. Шум спеклов, обусловленный когерентностью лазерного излучения и параметрами шероховатости, наличие бликов и переотражений;

4. Постобработка полученных 3D моделей: потеря информации в процессе фильтрации, триангуляции поверхности, создания NURBS поверхностей и др.

Большое внимание обращено на проблемы из-за шероховатости поверхности (все реальные поверхности имеют шероховатость) и влияние спеклов (лазеры имеют уникальные характеристики – высокая мощность, малая расходимость луча и высокая степень когерентности. Это обеспечивает протекание интенсивных интерференционных процессов, ограничивающих возможности систем, использующих фотосенсор).

Большое внимание обращено также на влияние формы, ориентации и характеристик отражающей поверхности.

В выводах первой главы сформулированы задачи и направления по совершенствованию лазерных триангуляционных 3D методов и устройств, обеспечивающих высокую точность и надежность при изготовлении сложных изделий. На рис. 1 показан принцип лазерной триангуляции.

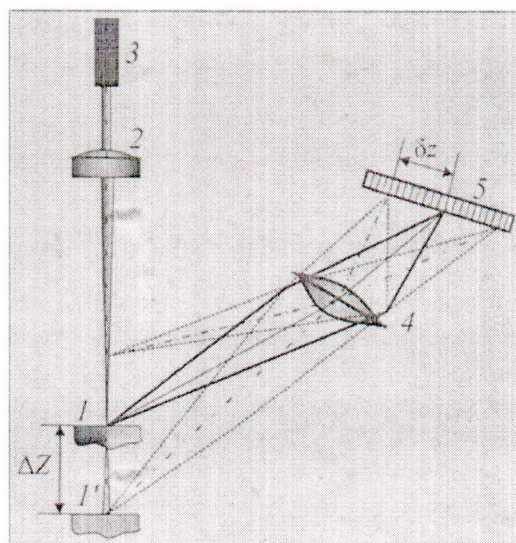


Рисунок 1. Принцип оптической триангуляции:

1, 1' – сканируемый объект: в центре рабочего диапазона (1) и на краю (1');  
 2 – коллиматор; 3 – источник когерентного либо некогерентного света; 4 – линза;  
 5 – фотосенсор

В методе лазерной триангуляции в оптическую схему устройства входят источник лазерного (оптического) излучения, фотосенсор и объект, который необходимо измерить или выполнить 3D-сканирование. Отраженный от объекта зондирующее излучение попадает на фотосенсор. Перемещение зондирующего пятна на фотосенсоре соответствует перемещению (смещению) сканируемого объекта. В процессе сканирования распределение интенсивности отраженного сигнала на фотосенсоре может сильно искажаться. В результате может появляться смещение центроиды энергетического распределения пятна. Это приводит к возникновению погрешностей измерений. Точность устройства возрастает с уменьшением диапазона измерения датчика, однако, это приводит к увеличению базового расстояния между лазером и фотосенсором, что в свою очередь является причиной появления «слепых» зон при сканировании объекта.

Вторая, третья и четвертая главы составляют теоретическую основу кандидатской диссертации.

**Во второй главе** представлена модель формирования изображения через отверстие (модель перспективной проекции), описывающая геометрические взаимосвязи между объектом реального мира (3D) и их плоским (2D) изображением. Камера-обскура является математической моделью идеальной камеры с линзой. Представлено геометрическое преобразование из евклидова трехмерного пространства  $R_3$  в евклидово двумерное пространство  $R_2$ , которое называется проекционным преобразованием. Процесс преобразования 2D точки на изображение в 3D точку реального пространства называется обратным проекционным преобразованием 2D в 3D.

Описывается преобразование однородных координат из системы координат камеры в систему координат плоскости изображения. Математически ротация и трансляция камеры определяется как вращение матрицы  $R$  размером  $3 \times 3$  и вектором сдвига  $t$  размером  $3 \times 1$ . Представлены схема, операции и этапы преобразования системы координат из мировой в систему координат камеры. Эти

операции могут быть записаны как

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \bar{M}' \Rightarrow \bar{M}' = \begin{bmatrix} R^T & -t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \bar{M}$$

Обсуждаются различия и особенности источников обычного и лазерного излучения при конструировании оптической системы фокусировки и формировании изображения в триангуляционном методе камеры-обскуры (математическая модель камеры с линзой); влияния на процессы направленности и когерентности источников излучения. Приводятся классификация и требования по безопасности применения лазеров для триангуляционного метода контроля.

**Третья глава** посвящена исследованиям по повышению точности метода лазерной триангуляции. Обсуждается влияние взаимного расположения камеры и лазера (формы и характеристик поверхности объекта, разрешение, скорость сканирования, выбор подходящих линз и лазера).

Приведены и анализируются основные (обратная нормальная, зеркальная, диффузная) схемы положения камеры и лазера, использующиеся для принципа (метода) лазерной триангуляции; свойства поверхности (матовая, блестящая, цветная) объекта; размеры и фокусное расстояние линз; характеристики лазера по мощности излучения и углу раскрытия излучения; области интереса (зона фотосенсора: количество строк и столбцов изображения на фотосенсоре).

Обсуждается выбор и результаты применения алгоритма поиска центра лазерной линии: алгоритма поиска с помощью горизонтального порога; алгоритма на основе определения положения пика распределения отраженного лазерного излучения на фотосенсоре; комбинированного алгоритма; алгоритма на основе метода центра тяжести; алгоритма на основе медианного метода. Последние алгоритмы получили наиболее широкое применение и дали наилучшие результаты по точности измерений.

Камера и лазер представляют собой систему, базирующуюся на активном стереоскопическом методе. Существует два типа лазерной подсветки для триангуляционных измерений. Первый – это точечная подсветка. Второй – подсветка в виде линии. Второй тип предпочтителен в силу того, что время сканирования меньше (за один кадр происходит захват нескольких сотен точек с большей площади), но он и более сложный. Световая плоскость создается за счет развертки лазерной точки в линию с помощью цилиндрической линзы или проектора со специальной меткой. Точка ( $M$ ) на объекте принадлежит двум мировым координатам. Точка ( $M'$ ), находящаяся в плоскости изображения камеры, принадлежит системе координат камеры. Мировые координатные системы и система координат камеры принадлежат трехмерному евклидову пространству и формируют трехмерную 3D систему. При этом плоскость изображения является 2D двумерной системой. Рассмотрим зондирующий луч лазера. Лазер находится в мировой системе координат. Это означает то, что лазер находится в той же системе координат, что и камера. Центр лазера задается таким образом, как начало координат всей 3D-системы камеры. Для исключения факторов, искажающих форму гауссовского сигнала на фотосенсоре предложен метод ортогонального сэмплирования оптического сигнала в триангуляционной схеме лазерного сканера (Рис. 2).

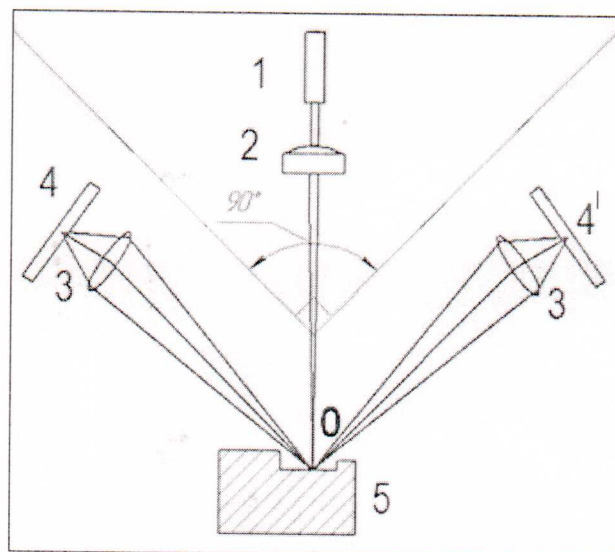


Рисунок 2. Оптическая схема ортогонального триангуляционного сканера:  
 1 – лазер; 2 – интерференционный фильтр; 3 – объектив для фотосенсора;  
 4 – фотосенсор; 5 – объект

Для фотосенсора 4 переход в точке О на компьютерной модели будет выглядеть как впадина, а для фотосенсора 4' как «горка». При противоположном положении зон с разным коэффициентом отражения, на компьютерной модели с фотосенсора 4 будет «горка», а с фотосенсора 4' будет впадина. Таким образом использование сканера с двумя фотосенсорами, позволяет не только эффективно избегать «слепых зон», но и практически полностью компенсировать ошибки, вызванные резким изменением коэффициента отражения на поверхности, используя среднее арифметическое между двумя значениями сигналов с фотосенсоров. При этом среднеквадратическая ошибка снижается не в  $\sqrt{2}$  раз, как в случае усреднения сигнала с двух фотосенсоров, а полностью компенсирует влияние зон. Ортогональный сканер успешно справляется и с влиянием резкого изменения коэффициента отражения. В ортогональном триангуляционном сканере, если один сенсор наблюдает искаженное пятно (рис. 3а), то второй будет наблюдать это пятно под углом 90 градусов, т.е. «увидит» его неискаженный профиль.

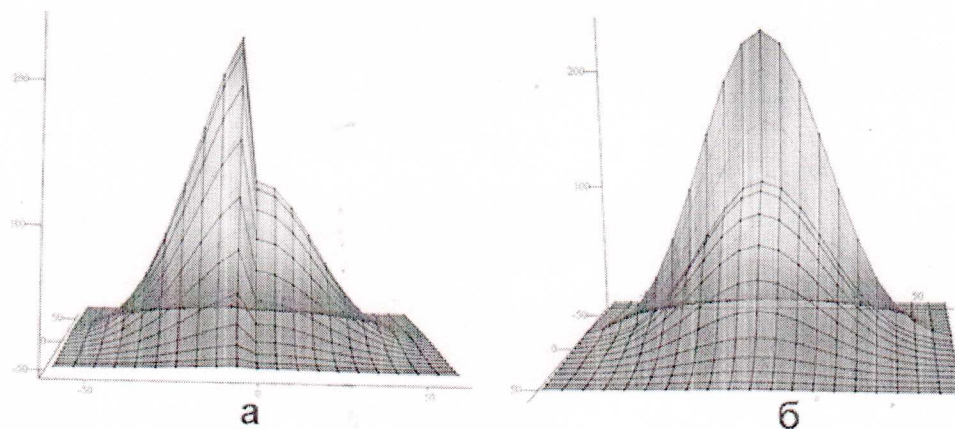


Рисунок 3. Трехмерное распределение лазерного пятна:  
а) вид пятна, видимый с фотосенсора 4 ортогонального триангуляционного датчика, б) вид пятна, видимый с фотосенсора 4' ортогонального триангуляционного датчика

Данный сканер помогает сократить влияние теневых эффектов при сканировании сложной формы деталей и может отделять истинные сигналы от ложных, с помощью ортогонально расположенных фотосенсоров. Устройство устраняет теневые эффекты и снижает вероятность присутствия ложного сигнала на двух фотосенсорах одновременно.

В **четвертой главе** представлены методы калибровки лазерного триангуляционного сканера. Калибровкой называется процесс определения внутренней геометрии камеры и оптических характеристик (внутренние параметры) и нахождения положения и ориентации камеры в трехмерном пространстве в мировой системе координат (внешние параметры).

Калибровка – это определение точки  $P$ , лежащей на сканирующем объекте в мировой системе координат с помощью внутренних и внешних параметров камеры. Если отношение между точкой изображения и соответствующей точкой в 3D системе координат реального мира можно записать как  $x = P \cdot X$ , то это можно переписать в виде:

$$P = k \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix}$$

и уравнение перспективной проекции имеет вид:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & S & P_x \\ 0 & f_y & P_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix},$$

K                      R/T                      X

где  $K$  – калибровочная матрица,  $R$  – матрица поворота ( $3 \times 3$ ),  $T$  – вектор переноса ( $3 \times 1$ ),  $f$  – фокусное расстояние,  $P_x, P_y$  – центр изображения  $f_x, f_y$  – размер пикселя. Точка  $P$  имеет 11 степеней свободы (5 – внутренних, 3 – вращения, 3 – переноса).

Приведены соотношения, учитывающие отклонения от идеальной модели (камеры-обскуры) при формировании внутренних параметров камеры с использованием реальной оптики (линз), а также соотношения, учитывающие ротацию и трансляцию (перенос) внешних параметров камеры (сканера).

Обсуждаются результаты калибровки лазерного сканера с использованием

калибровочных таблиц и шаблонов с треугольными зубцами; разработки алгоритма вычисления внутренних параметров камеры для калибровки лазерного триангуляционного сканера с использованием метода наименьших квадратов; сканирования объекта с помощью лазерного триангуляционного сканера с линейной подсветкой; сканирования изделий с помощью ортогонального триангуляционного сканера (Рис. 4).

Калибровка прибора происходит по всему рабочему диапазону для нескольких углов наклона. При сканировании шаблона, расположенного под наклоном, происходит смещение изображений зондирующего и маркерного пятна друг относительно друга. На основе этого строятся калибровочные кривые, которые позволяют при сканировании практически полностью компенсировать влияние наклона. По краям рабочего диапазона максимальная погрешность измерения составила 10 мкм.

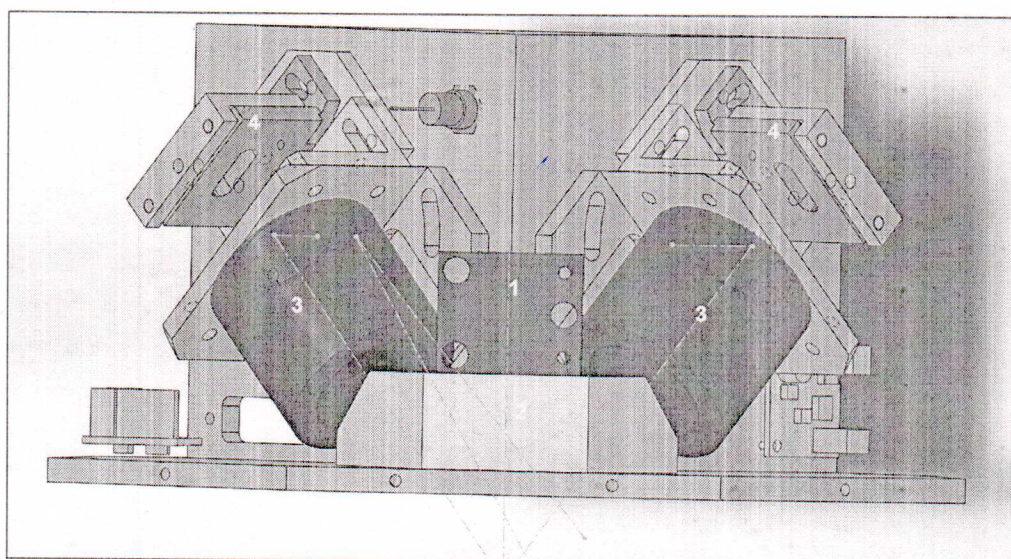


Рисунок 4. Ортогональный триангуляционный сканер (3D-модель):  
1 – лазер, 2 – коллиматоры, 3 – объективы, 4 – фотосенсоры.

На рис. 5, а показан результат сканирования триангуляционным датчиком со стандартной оптической схемой, а на рис. 5, б – 3D-модель, полученная с использованием ортогонального триангуляционного датчика.

Видно, что с помощью ортогонального триангуляционного сканера получено высококачественное изображение сканируемой области, учитывающее влияние бликов, засветок, слепых зон и др.

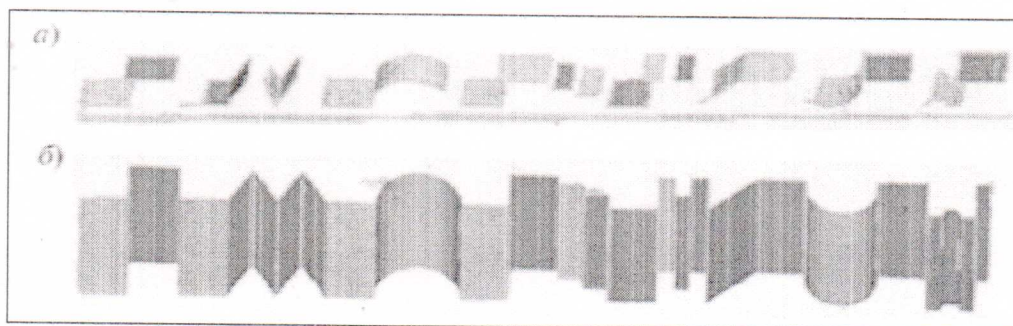


Рисунок 5. Сравнение компьютерных моделей калибра, отсканированных обычным триангуляционным датчиком (а) и с помощью ортогонального триангуляционного датчика (б)

**Пятая глава** посвящена описанию и анализу некоторых направлений применения лазерных триангуляционных 3D сканеров.

Одной из актуальных проблем при производстве строительных материалов является оперативный контроль толщины кровельных материалов в процессе производства. Рубероид представляет собой поверхность с сильной шероховатостью, структурированностью и волнистостью, образованную тремя слоями. Точное измерение и вычисление толщины кровельных материалов в процессе производства – сложная многоплановая научно-техническая задача. Описано содержание алгоритма разработанного на основе метода вычисления эффективной толщины, использующий интегральный способ разделения волнистости, устранения влияния глубоких впадин и пиков гранул с применением фильтра Гаусса, обеспечивающего эффективное шумоподавление. Представлены: система измерения толщины кровельных материалов, включающая в себя шкаф управления и синхронизации датчиков; сами триангуляционные датчики (оптическая часть, схема питания, схема преобразования интерфейсных данных); устройство синхронизации; содержание, этапы, последовательность, способы управления технологических процессов контроля на движущемся конвейере толщины кровельных материалов (Рис. 6).

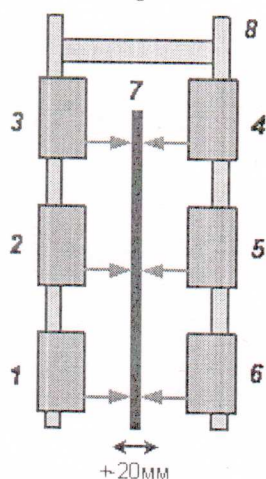


Рисунок 6. Принцип измерения системы: 1-6 – лазерные триангуляционные датчики, 7 – лист измеряемого кровельного материала, 8 – кронштейн

Огромная проблема в машиностроении – производство и импортозамещение высокоэффективного инструмента для механической обработки – фрезы, сверла, метчики, токарные пластины. В данной главе обсуждаются предложения получения высококачественных серийных образцов инструмента путем: бесконтактного 3D сканирования с пятью координатами свободы, измерения режущих кромок и обратного инжиниринга – получение высокоточных CAD-моделей, на основе которых создаются управляющие программы для обрабатывающих центров.

Разработан программно-аппаратный комплекс, включающий в себя: 5-осевую лазерную установку (КИМ) на основе сервоприводов (три основные оси, одна ось наклона, одна ось поворота) (рисунок 7); запатентованный лазерный ортогональный 3D-сканер; универсальный синхронизатор для интеграции любых ЧПУ систем на разных типах двигателей (шаговые, серво, линейные) и разными типами управляющих сигналов с 3D-сканерами и компьютером.

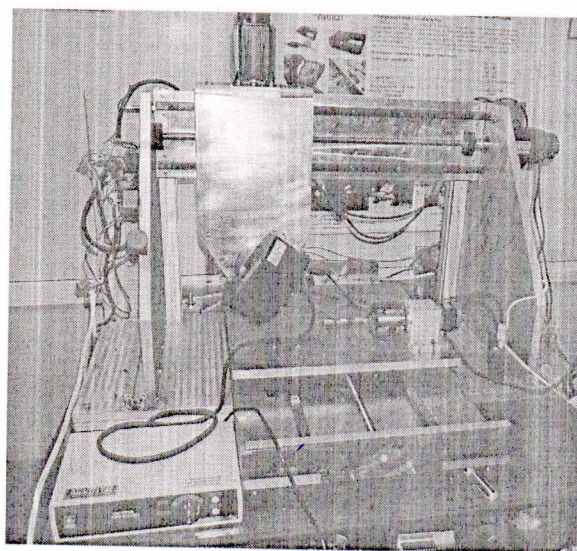


Рисунок 7. 5-осевая лазерная установка (КИМ) прецизионного измерения и контроля инструмента для механообработки.

Предлагается программное обеспечение для 3D-сканирования: захват облака точек, визуализация 3D-модели, построение поверхности, создание STL-файла, редактирование (фильтрация, удаление шумов, выбросов), сшивка сканов, постобработка (сегментация, кластеризация) и др. – рис. 8.

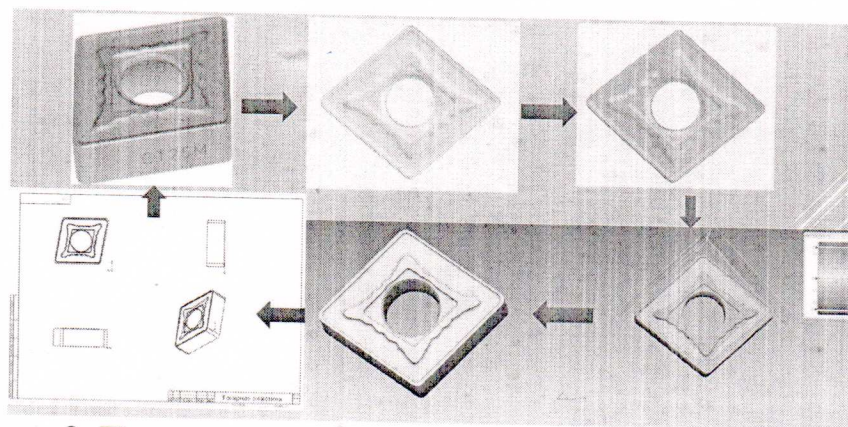


Рисунок 8. Процесс реверсивного инжиниринга токарной пластины: 1) оригинальное изделие 2) трехмерное облако точек 3) STL модель 4) поиск отклонений 5) CAD-модель 6) чертеж

Описывается технология обратного (реверсивного) инжиниринга с использованием лазерных триангуляционных сканеров и мультисенсорного лазерной установки (КИМ)

В **заключении** приведены наиболее важные результаты, полученные в

диссертационной работе.

### **Заключение**

В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований в диссертационной работе получены очень важные научные и практические результаты. Из них хочется выделить следующие:

1. Разработана теоретическая модель камеры-обскуры; алгоритмы формирования линий, проектируемых на объект и нахождения трехмерной координаты; оптические схемы, методы и лазерные триангуляционные сканеры, обеспечивающие получение цифровых 3D копий без использования шаблонов, калиброванных таблиц, и доработки в специальных пакетах программ.

2. Проанализированы и определены факторы, влияющие на точность метода лазерной триангуляции 3D сканирования. Определены зависимости влияния размеров, форм и цвета распределения интенсивности пятна зондирующего лазерного излучения от шероховатости, отражательной способности поверхности, поляризации и микротопологических неровностей, которые представляют собой множество беспорядочно ориентированных микрозеркал.

Показано, что уменьшение размеров лазерного пятна повышает точность нахождения его центра (центроиды); при этом слишком малое пятно уменьшает глубину резкости формируемого изображения и затрудняет работу алгоритмов поиска центра распределения отраженного импульса зондирующего излучения с субпиксельной точностью.

3. Разработаны защищенные патентом ортогональный лазерный триангуляционный метод и устройство, позволяющее уменьшить влияние теневых эффектов при сканировании объектов со сложной поверхностью и эффективно сепарировать истинные сигналы от ложных за счет ортогонально расположенных фотосенсоров с точностью от 10 мкм.

4. Выявлены закономерности между фрактальностью поверхности различных материалов и точностью измерения толщины материала с присыпкой с применением лазерного сканирования. Показано, что для формирования профиля основы поверхности корда кровельного материала используется сочетание фильтров для впадин и пиков.

5. Разработаны алгоритм и защищенные патентом устройство для контроля толщины кровельных материалов на движущемся конвейере с помощью лазерного триангуляционного точечного сканера.

6. Разработана 5-осевая мультисенсорная лазерная триангуляционная КИМ (контрольно-измерительная машина), обеспечивающая одновременное измерение формы, микротопологии и шероховатости сложной поверхности изделия в процессе его производства с помощью одной системы.

7. На базе 5-осевой лазерной КИМ, оснащенной ортогональным триангуляционным 3D сканером реализованы высокоточная и скоростная мультисенсорная технология, мультисенсорная стратегия и обратный (реверсивный) реинжиниринг и контроль при изготовлении современного металлорежущего инструмента (фрезы, метчики и т.д.) и изделий (катодный узел)

вакуумных металлокерамических дугогасительных камер (КДВ).

8. Лазерная система измерения толщины кровельных материалов на основе лазерных триангуляционных профилометров на движущемся конвейере внедрена на производстве АО «Рязанский картонно-рубероидный завод», г. Рязань, обеспечивая повышение производительности труда и снижение себестоимости изделия.

9. 5-осевая мультисенсорная лазерная КИМ и ортогональный триангуляционный 3D сканер внедрены на предприятии ООО «Проминструмент», г. Рязань, обеспечивая производство современного металлорежущего инструмента на уровне зарубежных аналогов.

Разработанные и освоенные в производстве точечные, линейные и объемные (3D) ортогональные лазерные триангуляционные сканеры успешно используются в строительной, железнодорожной, машиностроительной и автомобильной отраслях промышленности, обеспечивая повышение производительности труда при изготовлении изделий.

### **Список основных публикаций по теме диссертации**

#### ***В рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ***

1. Шадрин М.В., Демкин В.Н., Степанов В.А. Системы быстрого прототипирования с лазерным сканированием // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки – 2013 – № 3(177). С. 136-143.

2. Shadrin M. V., Savin V. N., Stepanov V. A. High-Speed Multisensor Method of Measurement, Control and 3D Analysis of Complex Object Shapes in Production Environment // ISSN 1060-992X, Optical Memory and Neural Networks. 2018, V. 27, Issue 1, pp 40–45.

3. Шадрин М.В., Савин В.Н., Степанов В.А. Технология измерения геометрических параметров микроинструмента на основе модели зрения человека // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки – 2019. Т. 12. № 1 С. 87-95

4. Stepanov V.A., Moos E.N., Shadrin M.V., Savin V.N., Umnyashkin A.V., Umnyashkin N.V. A triangulation sensor for measuring the displacements and high-precision monitoring of production performance // St. Petersburg State Polytechnical University Journal Physics and Mathematics. 2020, V. 13, No. 1, pp 54-66

#### ***Патенты Российской Федерации***

5. Шадрин М.В., Демкин В.Н., Жданов А.А., Пузырев А.С. Устройство для измерения толщины листовых изделий на конвейере // Патент № 114362 Российская Федерация, МПК С01В 11/06; заявитель и правообладатель ООО «Квантрон», – № 2011105633/28, заявл. 15.02.2011; опубл. 20.03.2012, бюл. № 8. – 2 с.

6. Шадрин М.В., Демкин В.Н., Демкин А.В. Устройство для лазерного сканирования // Устройство для лазерного сканирования // Патент РФ на полезную модель № 122167. Российская Федерация, МПК G01В 11/24; заявитель и правообладатель ООО «Квантрон», ООО «Синергия» – № 2012110279/28, заявл.

16.03.2012; опублик. 20.11.2012, бюл. № 32. – 3 с.

**В сборниках трудов Международных конференций**

7. Шадрин М.В., Демкин В.Н., Будагов Ю. Лазерные опорные системы // Международная научно-практическая конференция (выставка) «Фотоника». Москва. – 2012 – № 3. – С.38-39.

8. Shadrin M. V., Demkin V.N. Algorithm of highly accurate laser scanning in the systems of fast 3D building objects // Physics Of Laser Processes And Applications (PHLPA – 2012) Proceeding of scientific seminar, Ryazan State University named for S. Esenin – Ryazan, 2012 – pp. 105-108.

9. Шадрин М.В., Демкин В.Н., Савин В.Н. Методы калибровки цифровых видеокамер // Труды II Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании» ИНПО-13, Рязань, 2013. – С. 34-40.

10. Шадрин М.В., Савин В.Н. Погрешности 3D-сканирования окрашенных объектов методом лазерной триангуляции // Труды II Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании» ИНПО-14, Рязань, 2014. – С. 16-20.

11. Шадрин М.В., Савин В.Н., Степанов В.А. Высокоскоростная мультисенсорная технология измерения, контроля и 3D анализа объектов сложной формы в условиях производства // XXV Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», Новороссийск, ГМУ имени И.Ф. Ушакова, 2017. С.5.

12. Шадрин М.В., Савин В.Н., Степанов В.А., Пугин К.В., Головков О.Л. Лазерное устройство для измерения и контроля внутренних отверстий изделия // XXV Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», Новороссийск, ГМУ имени И.Ф. Ушакова, 2017. С.6.

13. Шадрин М.В., Демкин В.Н., Савин В.Н., Степанов В.А. Лазерное сканирование цветоконтрастных объектов на станках с ЧПУ // XXVI Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», Новороссийск, ГМУ имени И.Ф. Ушакова, 2018. С.20.

14. Шадрин М.В., Савин В.Н., Степанов В.А. Оптическое устройство для измерения и контроля микроинструмента // XXVI Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», Новороссийск, ГМУ имени И.Ф. Ушакова, 2018. С.29.

15. Шадрин М.В., Савин В.Н., Степанов В.А. Устройство для измерения и контроля зазоров скважинных нефтяных фильтров // XXVI Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», Новороссийск, ГМУ имени И.Ф. Ушакова, 2018. С.22.

16. Шадрин М.В., Савин В.Н., Степанов В.А., Умняшкин А.В., Умняшкин Н.В., Лепехов А.В. Триангуляционный датчик для измерения перемещения и геометрических параметров изделий // XXVII Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и

транспорте», Новороссийск, ГНПУ, 2019. С.16.

17. Шадрин М.В., Савин В.Н., Степанов В.А., Умняшкин А.В., Умняшкин Н.В., Лепехов А.В. Интеллектуальная система технического зрения для АНПА Neptun 3D на основе лазерной триангуляции // XXVII Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», Новороссийск, ГНПУ, 2019. С.18.

Шадрин Максим Владимирович

**Лазерный триангуляционный 3D метод и установка  
для прототипирования и изготовления сложных изделий**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 08.07.2020 Формат бумаги 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. Л. 1,0.

Тираж 100 экз.