

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 624.729.14:620.179.15

МИРЗАВАНД

Мохсен Али

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗМЕРОМЕТРИИ И ДЕФЕКТОСКОПИИ
АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОЙ
ИТЕРАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

Минск, 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

- Научный руководитель **ЗОЛОТАРЕВ Сергей Алексеевич**,
доктор технических наук, главный научный
сотрудник лаборатории вычислительной диа-
гностики ГНУ «Институт прикладной физики
НАН Беларуси»
- Официальные оппоненты: **АЗАРОВ Илья Сергеевич**,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой ЭВС БГУИР;
РЫБАК Виктор Александрович,
кандидат технических наук, доцент, заведую-
щий кафедрой ПОСТ БГАС
- Оппонирующая организация ГНУ «Объединенный институт проблем ин-
форматики НАН Беларуси»

Защита состоится 22 июня 2018 г. в 16⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т. Независимости 65, ауд. 202; тел. учебного секретаря (017) 2939564, e-mail: ngursky@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «12» мая 2018 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

Н. Н. Гурский

© Мирзаванд М. А., 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированные системы визуального контроля технических и биологических объектов и управления технологическими процессами по его результатам широко распространены в различных областях промышленности и диагностической медицины. Процессы визуального контроля в большинстве данных систем сводятся к анализу цифровых изображений внутренней структуры изделий и органов человека, получаемых такими методами, как микрофотография, рентгенография, рентгеновская томография, ультразвуковая диагностика и т. д., на предмет выявления таких дефектов, как микротрещины, неоднородности структуры или для выявления различных патологий внутри, например, молочной железы женщин. Исследование внутренней структуры производственных деталей со сложной пространственной геометрией, а также медицинская диагностика патологических новообразований внутри различных органов человека не могут быть осуществлены без использования новых средств контроля качества и диагностики, позволяющих получать необходимую информацию из внутренних областей исследуемого объекта.

Важнейшим из методов, позволяющих получить такого рода информацию, является рентгеновская томография. Рентгеновская томография по своей сути представляет собой реконструкцию распределения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения внутри исследуемого объекта контроля. Этот процесс может быть описан как определенная вычислительная операция над рентгеновскими проекциями, которые определяются при рентгеновском сканировании контролируемого объекта для заранее заданного количества проекционных видов, которые занимают требуемый угловой диапазон. После реконструкции можно путем анализа, полученного при этом, как правило, трехмерного изображения исследуемого объекта детально определить как геометрическую структуру, так и характер объемного распределения линейного коэффициента ослабления.

Важно заметить, что с каждым годом растет объем обрабатываемых изображений и появляются все новые классы прикладных задач, в значительной мере расширяющих границы области применения подобных томографических алгоритмов. В результате возникает ситуация, в которой существующие системы обработки томографических изображений не включают всех необходимых процедур или обладают недостаточным быстродействием. Как правило, для их эксплуатации требуются дорогостоящие специализированные рабочие станции или вычислительные кластеры с очень высокой скоростью обработки. Таким образом, назрела необходимость повышения скорости получения и обработки высокоразмерных томографических изображений в автоматизированных контролируемых системах, с учетом ограниченной мощности обычных ПК.

Например, высокая скорость обработки изображений необходима в современных автоматизированных производствах для автоматической размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья. Одной из частей системы контроля качества является проверка литых колес для обнаружения дефектов

с помощью рентгеновского контроля. Во время процесса литья могут появляться дефекты, такие как поры, раковины или трещины.

Применяемая в Европе система ISAR (интеллектуальная система для автоматической радиографии) проверяет колеса без поддержки человека сразу после процесса литья. Программное обеспечение оценивает рентгеновские изображения, обнаруживает дефекты и сравнивает их с инструкцией по качеству. Колеса, классифицированные как дефектные, отклоняются.

Однако современные методы радиоскопического автоматизированного контроля, основанные на обработке двумерных изображений, не содержат информации о глубине залегания дефекта и, следовательно, информация о точном местоположении и размере дефекта относительно третьего измерения не доступна в случае радиоскопической визуализации.

Чтобы преодолеть недостатки стандартных радиоскопических методов, а именно, отсутствие информации о форме дефектов, об их точном расположении или, кроме того, о внутренней конструкции сложных внутренних структур, должна применяться трехмерная компьютерная томография, которая доказала свой потенциал для решения этих проблем. Производственный процесс комплексного контроля алюминиевых отливок с использованием встроенной автоматизированной системы контроля качества на основе применения трехмерной КТ подробно описан в подразделе 1.4.3. В рамках данной диссертационной работы мы сосредоточим свое основное внимание на разработке новых быстрых методов и алгоритмов, а также программного обеспечения, направленных на ускорение процесса реконструкции и на преодоление имеющейся в реальных задачах зашумленности входных проекционных данных.

Основной целью этого научного исследования – является подавление влияния шумов и повышение быстродействия реконструкции и последующей обработки трехмерных изображений (улучшение контраста, выделение особенностей, сегментация) в рентгеновских томографах с учетом ограниченной вычислительной мощности современных персональных компьютеров, что должно позволить использовать улучшенные алгоритмы реконструкции для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья. На сегодняшний день наиболее распространенным алгоритмом является алгоритм, основанный на методе фильтрованных обратных проекций (**FBP**). В данной работе будет показано, что в ряде случаев предложенный эвристический статистический алгоритм томографической реконструкции обеспечивает лучшее качество реконструированных изображений. Для внедрения алгоритмов реконструкции в повседневную практику, как в медицине, так и в промышленности исключительно важной характеристикой является возможность его ускорения при помощи использования аппаратной части компьютера, в частности, – графического процессора видеокарты. Для предлагаемого алгоритма такое ускорение обеспечено путем разработки вычислительного алгоритма на основе специальных процедур и функций графической библиотеки *OpenGL*, которая является обязательным компонентом всех операционных систем семейства *Windows*. Отметим, что использование геометрической схемы

сканирования общепринятой для томографической маммографии возможно и для контроля пассажирского багажа, что сразу существенно расширяет область применения предлагаемого статистического итерационного алгоритма реконструкции.

Наконец, заметим, что не всегда мы можем реконструировать трехмерные изображения объектов контроля больших размеров. Любая видеокарта имеет ограниченный объем текстурной памяти – от сотен мегабайт до нескольких гигабайт. Возникает вопрос: как реконструировать изображение большой размерности, если текстурная память имеющейся видеокарты не может его вместить? Ответ на этот вопрос предложен в данной работе. Требования к объему текстурной памяти видеокарты могут быть в сто и более, раз снижены, если мы будем реконструировать высокоразмерное трехмерное изображение по слоям, причем для коррекции слоя изображения используется единственная двумерная текстура, которая по очереди подключается к текущему слою реконструируемого изображения. Впервые данный подход применен в этом диссертационном исследовании.

В заключение следует отметить, что в промышленности традиционные радиационные методы неразрушающего контроля не обеспечивают количественный контроль внутренней структуры сложных, пространственно разветвленных деталей и машиностроительных изделий. Таким образом, в области неразрушающего контроля, дефектоскопии, необходимы новые эффективные реконструктивные алгоритмы для получения более достоверной информации о внутренней конфигурации, местоположении дефектов структуры.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертация соответствует следующим приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг.: 5. Информатика и космические исследования и 13. Безопасность человека, общества и государства.

Цель и задачи исследования

Целью данной диссертационной работы – является подавление влияния шумов в проекционных данных и повышение быстродействия реконструкции и последующей обработки трехмерных изображений (улучшение контраста, выделение особенностей, сегментация) в рентгеновских томографах с учетом ограниченной вычислительной мощности современных персональных компьютеров, что должно позволить использовать улучшенные алгоритмы реконструкции для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1) создание быстрого статистического итерационного алгоритма реконструкции, обладающего улучшенными характеристиками подавления шумов, способного выполнять реконструкцию по ограниченному набору проекций (менее 400);

2) разработка эффективных вычислительных алгоритмов для быстрой итерационной реконструкции, использующих для ускорения вычислений графические процессоры и библиотеку *OpenGL* и позволяющих либо 1) значительно снизить необходимый объем текстурной памяти видеокарты, либо 2) в случае достаточного объема текстурной памяти позволяющих обеспечить быстродействие на порядок превосходящее быстродействие центрального процессора;

3) программного комплекса для осуществления трехмерной томографической реконструкции изображений объектов контроля по ограниченному числу проекций с автоматическим заданием входных и выходных параметров процесса реконструкции;

4) проверка разработанных вычислительных реконструктивных алгоритмов на экспериментальных входных данных и сопоставление результатов с результатами, полученными при использовании коммерческого софта.

Объектом исследования является процесс реконструкции и обработки трехмерных томографических изображений в автоматизированных контролируемых системах.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы математического восстановления внутренней структуры и пространственно распределенных свойств изображений объектов по косвенным результатам их просвечивания проникающим рентгеновским излучением.

Научная новизна

1. Создан быстрый математический алгоритм эвристической статистической итерационной реконструкции **HBIR**, позволяющий в значительной степени подавить влияние шумовой составляющей проекций и эффективно отобразить его на аппаратную часть ПК, позволяющий его использование для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья.

2. Разработана вычислительная методика для решения задачи послойной реконструкции трехмерных изображений объектов, имеющих пространственный угол обзора меньше чем 180° , основанная на применении алгоритма **HBIR**, ускоренного путем использования графического процессора, позволяющая многократно сократить объем текстурной памяти видеокарты, необходимой для реконструкции, за счет использования для прямого и обратного проецирования одной двухмерной текстуры.

3. Разработана вычислительная методика для решения задачи реконструкции трехмерных изображений объектов для полного угла обзора 360° , основанная на применении алгоритма **HBIR**, ускоренного путем использования графического процессора, обеспечивающая скорость вычислений, на порядок превосходящую скорость вычислений центрального процессора за счет использования вычислительных ресурсов графического процессора.

4. Предложен способ реконструкции трехмерных изображений объектов контроля при угле обзора меньше 180° , основанный на послойной реконструкции изображений объектов контроля, использующий для прямого и обратного проецирования одну двухмерную текстуру и позволяющий в сто раз сократить объем текстурной памяти видеокарты необходимой для реконструкции.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм эвристической статистической итерационной реконструкции **HBIR**, отличающийся от известных алгоритмов простотой программной реализации и возможностью эффективного аппаратного ускорения, способный выполнять реконструкцию по ограниченному набору проекций (менее 400), позволяющий его использование для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья.

2. Вычислительная методика для реконструкции трехмерных изображений объектов, основанная на применении алгоритма **HBIR**, ускоренного путем вычислений на графическом процессоре, обеспечивающая подавление шумов, позволяющая для угла обзора меньшего 180° сократить требуемый объем текстурной памяти видеокарты в сто раз, а для угла обзора 360° – десятикратно увеличить скорость вычислений, чем при использовании центрального процессора.

3. Способ томографической реконструкции трехмерных изображений объектов при угле обзора меньшим, чем 180° , основанный на прямом и обратном проецировании одной двухмерной текстуры, связываемой поочередно с различными слоями трехмерного изображения либо с корректирующим изображением, позволяющий сократить требуемый объем памяти видеокарты в сто раз.

4. Программный комплекс для осуществления трехмерной томографической реконструкции изображений объектов контроля по ограниченному числу проекций с автоматическим заданием входных и выходных параметров процесса реконструкции и с выборочным использованием либо итерационного статистического алгоритма реконструкции **HBIR**, либо алгоритма алгебраической реконструкции с одновременными итерациями **SART**.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Совместно с научным руководителем обсуждались формулировки и возможные методы решения задач. Соавторы публикаций принимали участие в формулировке задач и редактировании текста статей.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались на следующих конференциях и конгрессах:

1) NDT Days 2015 – Annual conference of the Bulgarian Society for NDT, 15–19 JUNE 2015, Workshop on Advanced Techniques in Non Destructive Testing Part II. New devices for NDT and procedures for its application, Sozopol, Bulgaria; June 2015;

2) MATEC Web of Conferences Volume 145 (2018) NCTAM 2017 – 13th. National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, Bulgaria, September 6–10, 2017 V. M. Vassilev, S. G. Nikolov, M. D. Datcheva and Y. P. Ivanova (Eds.);

3) 14-й Международной научно-технической конференции (69-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ). – Минск: БНТУ, 2016. – Том 1.

Результаты диссертации внедрены в НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ (имеется акт внедрения).

Опубликованность результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в девяти научных работах, из которых пять – статьи в научных журналах в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, две статьи на международных конференциях и два тезиса (общим объемом 5 авторских листов).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, основной части, состоящей из пяти глав, заключения, библиографического списка, списка собственных публикаций соискателя ученой степени и шести приложений.

Полный объем диссертации составляет 169 страниц, в том числе 68 рисунков занимают 24 страницы, 6 приложений приведены на 31 странице. Библиографический список содержит 55 наименований. Список собственных публикаций соискателя ученой степени по теме диссертации содержит 9 наименований работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены различные виды неразрушающего контроля литейных изделий. Показано, что современные методы радиоскопического автоматизированного контроля, основанные на обработке двумерных изображений, не содержат информации о глубине залегания дефекта и, следовательно, в этом случае информация о точном местоположении и размере дефекта относительно третьего измерения не доступна. Установлено, что для преодоления недостатков стандартных радиоскопических методов, а именно, отсутствие информации о форме дефектов, об их точном расположении или, кроме того, о внутренней конструкции сложных внутренних структур, должна применяться трехмерная компьютерная томография, которая доказала свой потенциал для решения этих проблем. Установлено, что компьютерная томография больше не должна использоваться только для лабораторных исследований. Современная технология создания плоских панельных детекторов в сочетании с новыми высокоскоростными методами реконструкции трехмерных изображений, например, описанный далее алгоритм (**НВIR**), и последующая быстрая оценка реконструированных изображений открывают возможность ввести этот мощный метод автоматизированного томографического неразрушающего контроля в литейное и машиностроительное производство.

В качестве первоочередных задач научных исследований, необходимых для использования томографии для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья следует выделить:

– создание усовершенствованных алгоритмов высокоскоростной реконструкции, работающих с ограниченным набором проекций;

– создание программного комплекса для высокоскоростной реконструкции изображений алюминиевых литейных изделий.

Во второй главе определены цели, поставлены актуальные задачи, требующие дальнейших исследований в области компьютерной томографии, указаны основные ограничения КТ. Кроме того, приведена классификация основных типов итерационных алгоритмов, описаны способы формирования векторов поправок для итерационных алгоритмов.

В результате проведенного анализа, можно сделать выводы о том, что основные проблемы итерационной вычислительной томографии заключаются в том, что, во-первых, размерность проекционной матрицы чрезвычайно велика (10^7 – 10^{10}); во-вторых, СЛАУ, описывающая математическую модель, является, как правило, недоопределенной и, следовательно, неустойчивой по отношению к точности задания входных данных; в-третьих, скорость сходимости итерационных алгоритмов, как наиболее пригодных для решения задач промышленной томографии, является невысокой, что в свою очередь приводит к необходимости разработки новых параллельных быстродействующих итерационных алгоритмов. Необходимо также заметить, что при ограниченном числе рентгеновских проекций, и недостаточном угле обзора задача реконструкции становится некорректной, что приводит к настоятельной потребности обеспечения регуляризированной схемы вычислений. Сформулировано основное направление исследований, проводимых в рамках диссертации, ориентированное на разработку новых быстрых итерационных реконструктивных методов, которые, позволяют эффективно подавить влияние шумовой составляющей во входных данных и, одновременно, обеспечить регуляризацию итерационного процесса.

Отметим еще, что, сравнительно недавно появились и начали активно разрабатываться методы и алгоритмы реконструкции, учитывающие как динамику изменения изображений, так и изменение взаимного положения измерительной системы и объекта. В монографии чл.-корр. НАН Беларуси В. М. Артемьева, А. О. Наумова и Г.-Р. Йениша «Реконструкция динамических изображений в томографии процессов» задача реконструкции изображений рассматривается как задача обработки многомерных сигналов, что позволяет использовать хорошо разработанные методы теории оценивания для ее решения. При этом реконструируемые изображения представляются случайными дискретными полями, для которых являются применимыми методы оценивания многомерных случайных последовательностей. В монографии и в статье «Fundamental of the Theory for Adaptive Image Reconstruction in X-Ray Tomography» В. М. Артемьевым и А. О. Наумовым была разработана и развита теория адаптивной рекуррентной реконструкции изображений медицинских и промышленных объектов контроля.

Третья глава посвящена быстрой реконструкции изображений с использованием графических процессоров. Обоснована необходимость использования параллельных итерационных алгоритмов компьютерной томографии и рассмотрены основные типы алгоритмов. Подробно рассмотрена трехмерная итерационная томографическая реконструкция с использованием графических процессоров. Указано, что одним из наиболее важных применений является

использование параллельных итерационных методов для решения больших систем алгебраических уравнений, к которым собственно и приводит трехмерная томографическая задача.

В качестве аппаратной части для организации быстрых параллельных предложено использовать графические процессоры (GPUs), которые могут обеспечить многократное ускорение вычислений для различных алгоритмов компьютерной томографии. Они как отдельная ветвь входят в класс многоядерных процессоров.

Использование многоядерных процессоров предоставляет гибкие возможности в части изменения конфигураций и масштабирования мощности вычислительных систем – от персональных компьютеров и рабочих станций до серверов и кластерных систем. Рассмотрен принцип аппаратного ускорения итерационной конической томографии. Показана организация прямого и обратного проецирования реконструируемого объекта с использованием текстурных отображений, которые аппаратно реализуются на графических процессорах. Реконструируемое трехмерное изображение делится на n слоев и каждый слой обрабатывается отдельно. Рисунок 1 иллюстрирует проекционный алгоритм, в котором отображение реконструируемого слоя на экран производится с помощью графической видеокарты. После того как все n текстурных полигонов будут накоплены в программном буфере, он будет содержать проекцию для проекционного угла φ . Принцип обратного проецирования рассмотрен на рисунке 2. В противоположность прямому подходу корректирующее изображение теперь, во-первых, перспективно проецируется на полигон, помещенный в местоположение слоя, который должен получить корректирующую поправку. После этого оно с помощью ортографической проекции повторно проецируется в буфер кадра. Корректирующее изображение выступает в качестве проективной текстуры, которая проецируется на полигон со слоем реконструируемого объекта, и он далее повторно ортографически проецируется в буфер кадра.

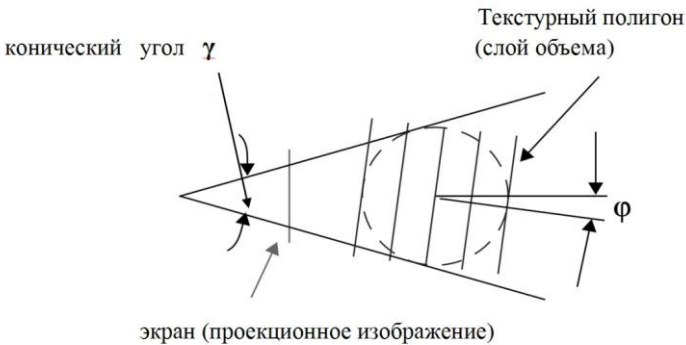


Рисунок 1. – Прямое проецирование. Проекционная геометрия

Во время выполнения обратного проецирования, необходимо наложить корректирующее изображение на слои реконструируемого объема. Это достигается с помощью ассоциации каждого слоя объекта, одного за другим, с экраном, на который проецируется корректирующее изображение, предварительно преобразованное в текстуру и наложенное на полигон. В принципе, это является ситуацией обратной, изображенной на рисунке 1, с экраном, представляющим слой восстанавливаемого объекта и полигоном с наложенной текстурой, представляющей собой корректирующее изображение.

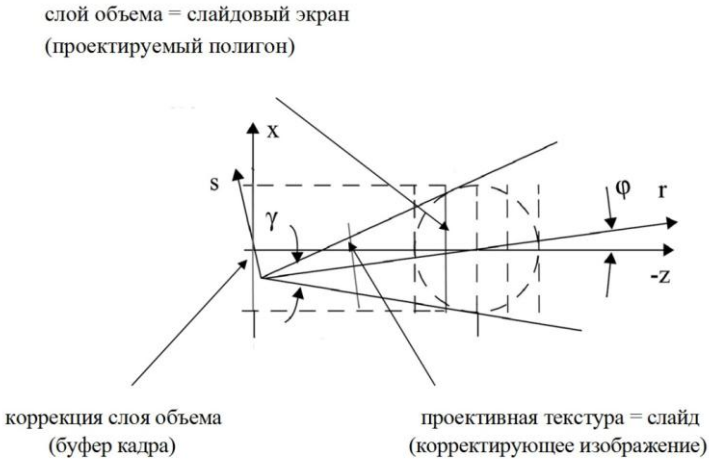


Рисунок 2. – Обратное проецирование. Проекционная геометрия

В второй главе разработан вычислительный алгоритм для решения задачи реконструкции трехмерных изображений объектов при угле обзора меньше 180° , основанный на применении алгоритма **HBIR**, позволяющий сократить объем необходимой для вычислений текстурной памяти видеокарты в сто и более раз.

Алгоритм реконструкции трехмерного изображения методом HBIR с минимальным объемом используемой текстурной памяти видеокарты

0: Разбиваем исходное трехмерное цифровое изображение объекта на n горизонтальных слоев. Далее каждый слой реконструируется отдельно.

1: Инициализируем двухмерное цифровое изображение текущего слоя объекта некоторым начальным ненулевым приближением.

2: **while** итерационный процесс сходится, то есть невязка на текущем векторе реконструируемого трехмерного изображения, составленного из n горизонтальных слоев, меньше чем на предыдущей итерации **do**

3: Переходим к следующей проекции P_ϕ .

4: Подключаемся к двумерной текстуре, которая будет содержать начальное приближение для текущего слоя объекта реконструкции.

5: С помощью функции *glTexSubImage2D()* загружаем в нее текущий слой объекта реконструкции из процессорной памяти компьютера.

6: Осуществляем прямое проецирование двумерной текстуры в буфер кадра с использованием аппаратного ускорения.

7: **if** проекционный слой не является последним **then**

8: Переходим к пункту 4:

9: **else**

10: Считываем модельную проекцию в процессорную память компьютера.

11: Рассчитываем корректирующее изображение, которое равно единице плюс величина разности экспериментальной и модельной проекций, деленной на модельную проекцию и умноженной на параметр релаксации $\lambda^{(k)}$, где k – номер текущей итерации.

12: Загружаем корректирующее изображение в текстурную память.

13: **end if**

14: Отображаем корректирующее изображение с использованием аппаратного ускорения на двумерную текстуру, содержащую текущий слой объекта реконструкции, перемножаем с ним и записываем на его место.

15: Считываем данные в буфере кадра из текстурной памяти видеокарты в процессорную память компьютера. Замещаем двумерное цифровое изображение текущего слоя объекта скорректированным изображением.

16: Сохраняем скорректированный слой в процессорной памяти компьютера.

17: Переходим к пункту 3:

18: **end if**

19: **end while**

Кроме того, разработан вычислительный алгоритм для решения задачи реконструкции трехмерных изображений объектов для угла обзора 360° , основанный на применении алгоритма *HBIR*, обеспечивающий максимальное быстродействие за счет выполнения большинства операций в текстурной памяти видеокарты.

Алгоритм реконструкции трехмерного изображения методом HBIR с максимальным быстродействием

1: Инициализируем трехмерное цифровое изображение некоторым начальным ненулевым приближением. Создаем трехмерную текстуру, содержащую начальное приближение.

2: **while** итерационный процесс сходится, то есть невязка на текущем векторе реконструируемого изображения меньше, чем на предыдущей итерации **do**

3: Переходим к следующей проекции P_ω , предварительно записываем в буфер кадра двумерную текстуру с экспериментальной проекцией объекта.

4: Осуществляем прямое проецирование слоя трехмерной текстуры в буфер кадра с использованием аппаратного ускорения (графический процессор).

Путем использования при проецировании функции графической библиотеки *glBlendEquation(Gl_Func_Reverse_Subtract)* накапливаем в буфере кадра разность экспериментальной и смоделированной проекций текущего слоя.

5: **if** проекционный слой не является последним **then**

6: Переходим к пункту 4:

7: **else**

8: Извлекаем в процессорную память компьютера из буфера кадра разность экспериментальной и модельной проекций с использованием функции графической библиотеки *glReadPixels()*.

9: Рассчитываем корректирующее изображение, которое равно единице плюс величина разности экспериментальной и модельной проекций, деленной на модельную проекцию и умноженной на параметр релаксации $\lambda^{(k)}$, где k – номер текущей итерации.

10: Загружаем рассчитанное корректирующее изображение в текстурную память видеокарты.

11: **end if**

12: Отображаем корректирующее изображение с использованием аппаратного ускорения на текущий слой трехмерной текстуры, перемножаем с ним и записываем на его место.

13: Сохраняем скорректированный слой в текстурной памяти видеокарты.

14: **if** скорректированный слой не является последним **then**

15: Переходим к пункту 12:

16: **else**

17: Переходим к пункту 3:

18: **end if**

19: **end while**

Предложен оригинальный способ томографической реконструкции трехмерных изображений объектов при угле обзора меньшим, чем 180° , основанный на последовательном прямом и обратном проецировании двухмерной текстуры, связываемой поочередно с различными слоями трехмерного изображения либо с корректирующим изображением, позволяющий сократить объем необходимой для вычислений текстурной памяти видеокарты в сто и более, раз.

В четвертой главе рассмотрены и программно реализованы методы обесшумливания изображений, а также алгоритмы увеличения контраста изображений путем применения метода пирамиды Лапласа и вейвлет-разложений. Данные программные коды были использованы как составные части программ для томографической реконструкции и предназначены для послыонного обесшумливания трехмерных изображений.

Установлено, что разложение изображения методом пирамиды Лапласа и применение вейвлет разложения позволяет усиливать контраст и делать хорошо различимыми на изображении крупные, средние и мелкие структуры одновременно. Эффективность разработанных алгоритмов была проверена на рентгеновских проекциях реального медицинского фантома головы человека (девушка) “Rozi”. На рисунке 3 представлена центральная проекция фантома

головы, и изображения после усиления контраста с использованием пирамиды Лапласа и вейвлет-преобразований.

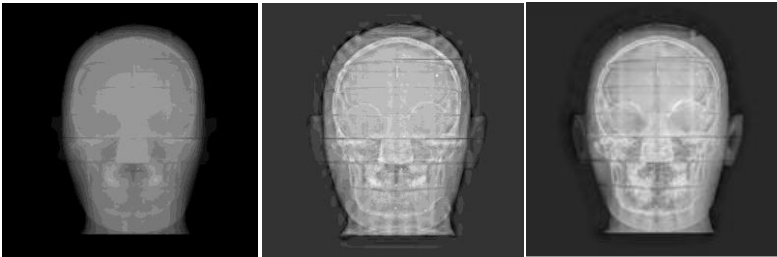


Рисунок 3. – Оригинальное изображение фантома “Rozi” слева; изображение после усиления контраста с помощью вейвлет-преобразования посередине; изображение после усиления контраста с помощью пирамиды Лапласа справа

Кроме того показано, что технология шумоподавления методом минимизации тотальной вариации гораздо более эффективна чем другие подходы, так как, обеспечивает сохранение резких границ, одновременно убирая шумы на однородных участках изображений, даже при низком отношении сигнал/шум.

Описан предложенный способ регуляризации итерационных алгоритмов томографической реконструкции методом тотальной вариации и приведены вычислительные алгоритмы реконструкции. Заметим, что минимизация тотальной вариации при реконструкции трехмерного изображения объекта, также как и другие способы обесшумливания, всегда осуществлялась на обычном процессоре в промежутке между корректирующими итерациями, поочередно для всех двухмерных горизонтальных слоев, что в конечном итоге приводило к обесшумливанию и улучшению всего трехмерного изображения.

В главе пять приведены примеры использования разработанных алгоритмов. Произведено численное тестирование нового эвристического метода статистической итерационной реконструкции по проекциям, полученным на линейном ускорителе Электа Синержи. Помимо мощного мегавольтного рентгеновского источника в многофункциональном ускорителе Электа Синержи имеется киловольтный источник рентгеновского излучения, предназначенный для осуществления конической реконструкции изображений пациентов с целью их правильного позиционирования перед осуществлением лучевой терапии. Рентгеновские проекции физического фантома «САТФАН» были получены с использованием киловольтного рентгеновского источника. Они были предоставлены профессором Юргеном Хессером из Медицинского центра города Мангейма (Германия). На рисунке 4 показаны поперечные сечения реконструированного трехмерного изображения фантома САТФАН 600 в месте расположения специальной вставки СТР528.

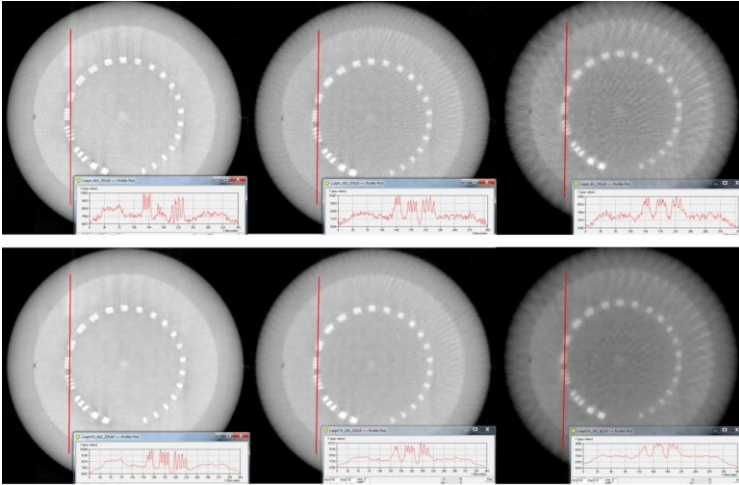


Рисунок 4. – Результаты реконструкции фантома CATPHAN в месте расположения вставки СТР528

В верхнем ряду показаны изображения характерного слоя фантома при использовании 82, 165 и 662 рентгеновских проекций (справа налево) без использования регуляризации. На них же приведены профили серых уровней вдоль прямых линий. Хорошо видна шумовая составляющая реконструированного сигнала, которая имеет примерно одну и ту же величину, независимо от числа используемых проекций.

В нижнем ряду показаны те же изображения, но полученные при регуляризации методом минимизации тотальной вариации. С целью изучения возможности выполнять виртуальные измерения на реконструированных трехмерных изображениях алюминиевых деталей, был подготовлен специальный образец на основе реального алюминиевого поршня, в котором были просверлены три серии отверстий. Две первые серии сверлений содержали по девять отверстий. Первые две серии отверстий, расположенных 1) на торцевой поверхности поршня и 2) в нижней части наружной цилиндрической поверхности поршня имели диаметры: 0,71; 0,82; 1,0; 1,1; 1,87; 1,97; 2,25; 2,69 и 3,0 (2,98) мм. Третья серия отверстий имела диаметры: 1,97; 2,98; и 8,0 мм и была расположена на торцевой поверхности бобышки поршня. Ниже на рисунке 5 показана фотография поршня с первой и третьей сериями отверстий.



Рисунок 5. – Первая и третья серия сверлений различных диаметров, расположенных на торцевых поверхностях поршня

На рисунке 6 показана вторая серия сверлений, расположенных на наружной цилиндрической поверхности поршня вблизи нижнего края.



Рисунок 6. – Вторая серия сверлений различных диаметров, расположенных на наружной цилиндрической поверхности поршня

Для осуществления рентгеновского сканирования вышеописанного экспериментального алюминиевого образца была использована рентгеноскопическая система X-Cube Compact. Эта установка представляет собой универсальный радиоскопический комплекс для выборочного контроля небольших партий различных объектов, таких как, отливки из легких металлов, изделия из стали, пластмассы, керамики и специальных сплавов. Она оборудована

рентгеновской трубкой с напряжением 225 кВ и манипулятором грузоподъемностью до 100 кг. Рентгеновская съемка была проведена в физико-техническом институте НАН Беларуси, на участке дефектоскопии лаборатории точной штамповки. На рисунке 7 показаны рентгеновские проекции алюминиевого поршня для углов сканирования: 0° , 45° и 90° .

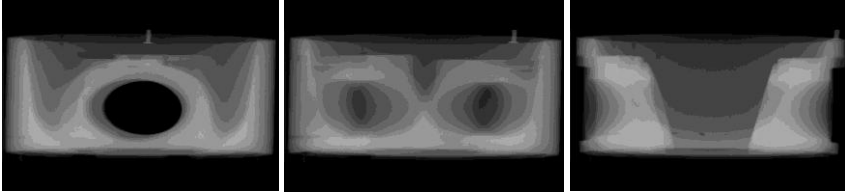


Рисунок 7. – Проекция алюминиевого поршня для углов 0° , 45° и 90°

На рисунке 8 показаны рентгеновские проекции для углов 180° и 270° .

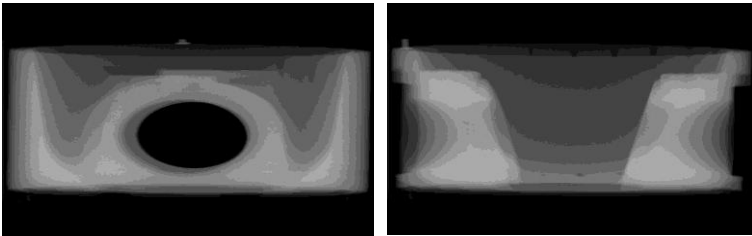


Рисунок 8. – Проекция алюминиевого поршня для углов 180° и 270°

Для проверочной томографической реконструкции было использовано 400 рентгеновских проекций с угловым шагом $0,9^\circ$. На рисунке 9 показаны перспективные виды реконструированного трехмерного изображения поршня: слева показан торцевой вид поршня, а справа – фронтальный вид поршня.

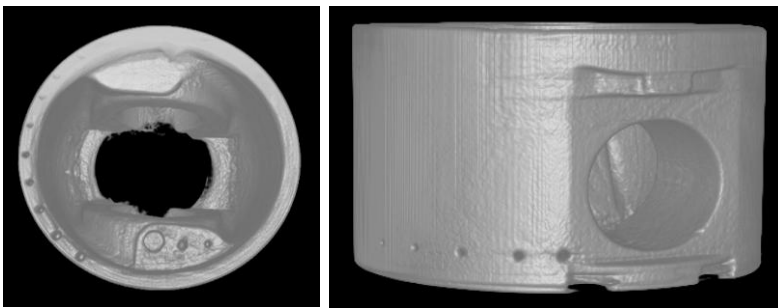


Рисунок 9. – Слева показан торец поршня, а справа – фронтальный вид

На реконструированном трехмерном изображении хорошо видны все серии искусственных дефектов. При съемке напряжение на рентгеновской трубке равнялось 116 кВ, анодный ток был равен 5,2 мА. Расстояние от рентгеновского источника до плоской матрицы детекторов было равно 1000 мм, а расстояние от источника до оси вращения равнялось 665 мм. Размеры отверстий определены с точностью до 0,18 мм.

Была также проведена реконструкция алюминиевого бокса на микрофокусном промышленном томографе фирмы Никон «ХТ Н 225/320». Рентгеновские изображения имели размерности 1840×1446 пикселей. Размер пикселя составил 0,127×0,127 мм. Расстояние от рентгеновского источника до матрицы детекторов было равно 1009,603 мм, а расстояние от источника до объекта – 775,478 мм. Реконструкция осуществлена методом *HBIR* по 575 проекциям, снятым через угловой интервал 0,62608695652174°. На рисунке 10 слева направо показаны рентгеновские проекции для углов 0°, 45°, 90° и 180°, а на рисунке 11 изображены перспективные виды алюминиевого бокса.

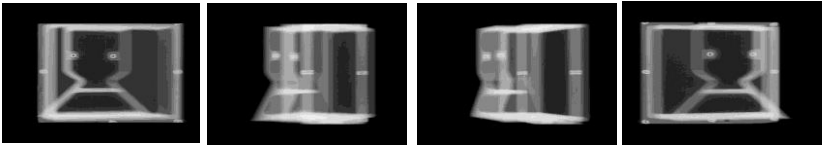


Рисунок 10. – Проекция алюминиевого бокса для углов 0°, 45°, 90° и 180°

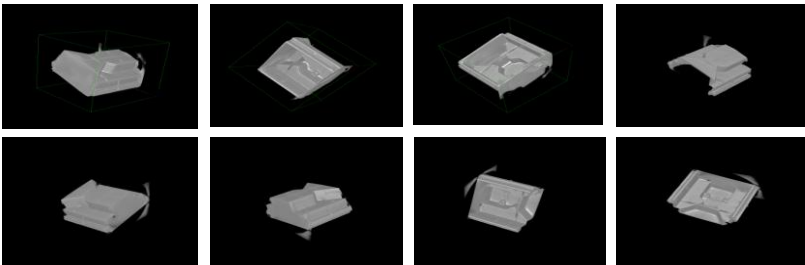


Рисунок 11. – Перспективные виды изображения алюминиевого бокса

На рисунке 12 слева направо показаны сечения реконструированного изображения алюминиевого бокса координатными плоскостями в месте расположения поры размером 1,5 мм.



Рисунок 12. – Слой XOZ_360, YOZ_646 и XOY_328

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан алгоритм эвристической статистической итерационной реконструкции **HBIR**, отличающийся от известных алгоритмов простотой программной реализации и возможностью эффективного аппаратного ускорения, способный выполнять реконструкцию по ограниченному набору проекций (менее 400), позволяющий его использование для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья [2, 3, 4, 5].

2. Разработана вычислительная методика для реконструкции трехмерных изображений объектов, основанная на применении алгоритма **HBIR**, ускоренного путем вычислений на графическом процессоре, обеспечивающая подавление шумов, позволяющая для угла обзора меньшего 180° сократить требуемый объем текстурной памяти видеокарты в сто раз, а для угла обзора 360° – десятикратно увеличить скорость вычислений чем при использовании центрального процессора [2, 3, 4, 5].

3. Предложен способ томографической реконструкции трехмерных изображений объектов при угле обзора меньшим, чем 180° , основанный на прямом и обратном проецировании одной двухмерной текстуры, связываемой поочередно с различными слоями трехмерного изображения либо с корректирующим изображением, позволяющий сократить требуемый объем памяти видеокарты в сто раз [2, 3, 4, 5].

4. Создан программный комплекс для осуществления трехмерной томографической реконструкции изображений объектов контроля по ограниченному числу проекций с автоматическим заданием входных и выходных параметров процесса реконструкции и с выборочным использованием либо итерационного статистического алгоритма реконструкции **HBIR**, либо алгоритма алгебраической реконструкции с одновременными итерациями **SART** [1, 2, 3, 4, 5].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты рекомендуется использовать при разработке новых программных средств рентгеновской томографии промышленных объектов, а также для разработки автоматизированных программных пакетов для конической томографической реконструкции трехмерных изображений объектов контроля. Наиболее перспективной является возможность внедрения разработанного программного комплекса для автоматического контроля и размеромерии алюминиевого литья. Акт о внедрении разработанных алгоритмов реконструкции приведен в приложении Ж.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах

1. Золотарев, С. А. Трехмерная реконструкция методом SART с минимизацией тотальной вариации / С. А. Золотарев, М. А. Мирзаванд // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 3. – С. 31–35.
2. Золотарев, С. А. Быстрая итерационная киловольтная томография в коническом пучке лучей / С. А. Золотарев, М. А. Мирзаванд // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 4. – С. 31–35.
3. Мирзаванд, М. А. Параллельная итерационная реконструкция фантома Catphan по экспериментальным данным / М. А. Мирзаванд // Информатика. – 2016. – № 1. – С. 58–63.
4. Zolotarev, S. A. Tomographic mammography and tomosynthesis using *OpenGL* / S. A. Zolotarev, M. A. Mirzavand // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 1. – С. 61–67.
5. Vengrinovich, V. L. Iterative Conic Beam Tomography Based on Bayesian Approach to Radiation Therapy / V. L. Vengrinovich, S. A. Zolotarev and M. A. Mirzavand // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, №. 4. – P. 824–830.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6. Zolotarev, S. A. 3D Iterative Conical and Spiral Tomography, Laminography, Tomographic Mammography and Tomosynthesis using *OpenGL* / S. A. Zolotarev, V. L. Vengrinovich, M. A. Mirzavand // NDT Days 2015 – Annual conference of the Bulgarian Society for NDT, Sozopol, Bulgaria, 15–19 JUNE 2015, Workshop on Advanced Techniques in Non Destructive Testing Part II. New devices for NDT and procedures for its application.
7. Zolotarev Sergei. Bayesian reconstruction of images of objects with high-density inclusions with suppression of artifacts / Sergei Zolotarev, Valery Vengrinovich, Mohsen Mirzavand, Mieteeg Mukhtar and Ivan Georgiev // MATEC Web of Conferences Volume 145 (2018) NCTAM 2017 – 13th. National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, Bulgaria, September 6–10, 2017, V. M. Vassilev, S. G. Nikolov, M. D. Datcheva and Y. P. Ivanova (Eds.).

Тезисы докладов на научных конференциях

8. Золотарев, С. А. Реконструкция изображения молочной железы методами ФОР и БИР / С. А. Золотарев, М. А. Мирзаванд // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2016. – Том 1. – С. 219.
9. Золотарев, С. А. Параллельная реконструкция изображений алюминиевых отливок с использованием графических процессоров / С. А. Золотарев, М. А. Мирзаванд // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2016. – Том 1. – С. 220.

Мірзаванд Махсен Алі

Аўтаматызацыя размераметры і дэфектаскапіі алюмініевага ліцця з выкарыстаннем трохмернай ітэрацыйнай тамаграфіі

Ключавыя словы: кампутарная тамаграфія, рэканструкцыя відарысаў, паралельныя алгарытмы, ітэрацыйныя статыстычныя алгарытмы, рэгулярызацыя.

Мэтай работы з'яўляецца падаўленне ўплыву шумоў і павышэнне хуткадзейнасці рэканструкцыі і наступнай апрацоўкі трохмерных відарысаў (паляпшэнне кантрасту, вылучэнне асаблівасцяў, сегментацыя), што павінна дазволіць выкарыстоўваць палепшаныя алгарытмы рэканструкцыі для аўтаматызацыі размераметры і дэфектаскапіі алюмініевага ліцця.

У выніку выканання работы створаны алгарытм статыстычнай рэканструкцыі NBIR, які адрозніваецца ад вядомых алгарытмаў прастатой праграмнай рэалізацыі, здольны выконваць рэканструкцыю па абмежаванаму набору праекцый (менш за 400), які дазваляе яго выкарыстанне для аўтаматызацыі размераметры і дэфектаскапіі алюмініевага ліцця.

Распрацавана метадыка для рэканструкцыі трохмерных відарысаў аб'ектаў, заснаваная на ўжыванні алгарытму NBIR, паскоранага шляхам вылічэнняў на графічным працэсары, якая забяспечвае падаўленне шумоў, якая дазваляе для кута агляду меншага 180° скараціць патрабаваны аб'ём тэкстурнай памяці відэакарты ў сто разоў, а для кута агляду 360° – дзясяціразова павялічыць хуткасць вылічэнняў.

Распрацаваны спосаб тамаграфічнае рэканструкцыі трохмерных малюнкаў аб'ектаў пры вугле агляду меншым, чым 180° , заснаваны на прамым і зваротным працэсаванні адной двухмернай тэкстуры, звязваюцца па чарзе з рознымі пластамі трохмернага відарыса альбо з карэцыйным выявай, які дазваляе скараціць патрабаваны аб'ём памяці відэакарты ў сто разоў.

Створаны праграмны комплекс для ажыццяўлення рэканструкцыі відарысаў аб'ектаў кантролю па абмежаванаму ліку праекцый з аўтаматычным заданнем ўваходных і выходных параметраў працэсу рэканструкцыі і з выбарам небудзь статыстычнага алгарытму рэканструкцыі NBIR, альбо алгарытму алгебраічнай рэканструкцыі SART.

Вынікі працы ўкаранены ў НИИПФП ім. А. М. Сеўчанкі з мэтай правядзення лікавых эксперыментаў для вызначэння аптымальных параметраў алгарытму статыстычнай ітэрацыйнай рэканструкцыі.

РЕЗЮМЕ

Мирзаванд Мохсен Али

Автоматизация размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья с использованием трехмерной итерационной томографии

Ключевые слова: компьютерная томография, реконструкция изображений, параллельные алгоритмы, итерационные статистические алгоритмы, регуляризация.

Целью работы является подавление влияния шумов и повышение быстродействия реконструкции и последующей обработки трехмерных изображений (улучшение контраста, выделение особенностей, сегментация), что должно позволить использовать улучшенные алгоритмы реконструкции для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья.

В результате выполнения работы создан алгоритм статистической реконструкции **HBIR**, отличающийся от известных алгоритмов простотой программной реализации, способный выполнять реконструкцию по ограниченному набору проекций (менее 400), позволяющий его использование для автоматизации размеромерии и дефектоскопии алюминиевого литья

Разработана методика для реконструкции трехмерных изображений объектов, основанная на применении алгоритма **HBIR**, ускоренного путем вычислений на графическом процессоре, обеспечивающая подавление шумов, позволяющая для угла обзора меньшего 180° сократить требуемый объем текстурной памяти видеокарты в сто раз, а для угла обзора 360° – десятикратно увеличить скорость вычислений.

Разработан способ томографической реконструкции трехмерных изображений объектов при угле обзора меньшим, чем 180° , основанный на прямом и обратном проецировании одной двухмерной текстуры, связываемой поочередно с различными слоями трехмерного изображения либо с корректирующим изображением, позволяющий сократить требуемый объем памяти видеокарты в сто раз.

Создан программный комплекс для осуществления реконструкции изображений объектов контроля по ограниченному числу проекций с автоматическим заданием входных и выходных параметров процесса реконструкции и с выбором либо статистического алгоритма реконструкции **HBIR**, либо алгоритма алгебраической реконструкции **SART**.

Результаты работы внедрены в НИИПФП им. А. Н. Севченко с целью проведения численных экспериментов для определения оптимальных параметров алгоритма статистической итерационной реконструкции.

SUMMARY

Mirzavand Mohsen Ali

Automation of measuring dimensions and defectoscopy of aluminum casting using three-dimensional iterative tomography

Keywords: computed tomography, image reconstruction, parallel algorithms, iterative statistical algorithms, regularization.

The aim of the work is to suppress the influence of noise and improve the speed of reconstruction and subsequent processing of three-dimensional images (contrast enhancement, feature isolation, segmentation), which should allow using improved reconstruction algorithms to automate the measurement and flaw detection of aluminum castings.

As a result of the work, the algorithm for statistical reconstruction of HBIR is created, which differs from the known algorithms in the simplicity of software implementation, capable of performing reconstruction on a limited set of projections (less than 400), allowing its use for automation of the measuring and defectoscopy of aluminum castings.

A technique for reconstructing three-dimensional images of objects was developed, based on the use of the HBIR algorithm accelerated by computations on a graphics processor, providing noise suppression, which allows for a viewing angle of less than 180° to reduce the required amount of texture memory of the video card by a factor of 100, and for a viewing angle of 360° , allowing to increase the speed of computation tenfold.

A method for tomographic reconstruction of three-dimensional images of objects with a viewing angle of less than 180° is developed based on the forward and backward projection of one two-dimensional texture that is linked alternately with different layers of a three-dimensional image or with a corrective image, which reduces the required video card memory by a factor of 100.

A software complex has been created for the reconstruction of images of objects of control for a limited number of projections with automatic specification of input and output parameters of the reconstruction process and with the choice of either a statistical reconstruction algorithm for HBIR or an algorithm for the algebraic reconstruction of SART.

The results of the work are implemented in the Research Institute of Applied Physical Problems named after A.N. Sevchenko for the purpose of conducting numerical experiments to determine the optimal parameters of the statistical iterative reconstruction algorithm.

Научное издание

МИРЗАВАНД
Мохсен Али

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗМЕРОМЕТРИИ И ДЕФЕКТОСКОПИИ
АЛЮМИНИЕВОГО ЛИТЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХМЕРНОЙ
ИТЕРАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ**

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,0.

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Тираж 60. Заказ 412.