

УДК 620.179.15.05

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-614-621

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТОМОГРАФИИ

И.М. Смирнов

АО НПК «АТРИ», Санкт-Петербург, 197343, Российская Федерация
 Адрес для переписки: marasovmarasov@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.04.19, принята к печати 25.05.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Смирнов И.М. Разработка и исследование методов вычислительной томографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 614–621. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-614-621

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы существующие методики автоматизированного контроля печатных плат. Предложено несколько альтернативных способов: представлены три подхода к реконструкции формы и внутренней структуры объекта. **Метод.** На этапе разработки за объект исследования взяты 22 рентгеновских снимка металлического винта, снятые с шагом в 7° , также одномерные и двухмерные массивы данных. Все представленные в работе методы реконструкции трехмерной формы и структуры объекта основаны на визуализации объекта исследования. Полученные цифровые снимки обрабатываются с помощью методов вычислительной томографии. Их суть заключается в применении специально разработанных алгоритмов реконструкции внутренней структуры объекта по проекционным данным — цифровым снимкам объекта. Первый метод основывается на преобразованиях Радона, реализованных посредством функции специальной библиотеки (среда MATLAB). Вторым методом получения формы и структуры объекта является математическая обработка пиксельных данных цифрового изображения в среде MATLAB. В третьем методе, по аналогии со вторым, за основу взята обработка пиксельных данных цифрового изображения, реализованная в программе на языке программирования Си. **Основные результаты.** Проведено сравнительное исследование всех трех методов. Получена необработанная реконструкция срезов объекта «винт» с массивом данных размерностью 400×400 пикселей. Показано, что наиболее универсальным и удобным для дальнейшей разработки является метод с использованием перебора пиксельных данных рентгеновского изображения с использованием специализированной программы, реализованной на языке программирования Си. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть полезны для специалистов, занимающихся методами неразрушающего рентгеновского контроля, в том числе при изготовлении печатных плат.

Ключевые слова

интроскопия, рентген, томография, вычислительная томография, цифровое изображение, модель, печатная плата, контроль, Си, MATLAB

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-614-621

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF COMPUTED TOMOGRAPHY METHODS

I.M. Smirnov

AO RPC ATHREE, Saint Petersburg, 197343, Russian Federation
 Corresponding author: marasovmarasov@gmail.com

Article info

Received 19.04.19, accepted 25.05.19
 Article in Russian

For citation: Smirnov I.M. Development and research of computed tomography methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 614–621 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-614-621

Abstract

Subject of Research. The paper presents the study of existing methods for automated control of printed circuit boards. Several alternative ways are proposed; namely, three approaches are considered for object form and internal structure reconstruction. **Method.** Twenty-two X-rays of a metal screw taken in 7° increments were chosen for the object of study at the development stage, as well as one-dimensional and two-dimensional data sets. All reconstruction methods of object three-dimensional form and structure are based on object display. The obtained digital images are processed by computed tomography techniques. Their key point is the application of specially developed algorithms for reconstruction of an object internal structure using projection data — object digital images. The first method is based on Radon transforms implemented by special libraries (MATLAB

environment). The second method of an object form and structure development consists in mathematical processing of digital image pixel data in the MATLAB environment. The third method, in a similar way to the second, is based on the image pixel processing method implemented in the C programming language program. **Main Results.** Comparative study of all three methods is carried out. An unprocessed reconstruction of "screw" object slices with data array of 400×400 pixels is obtained. It is shown that the most versatile and open method for further development is the method that involves searching of X-ray pixel data by special program on C programming language. **Practical Relevance.** The results of the work can be useful for professionals involved in non-destructive X-ray inspection methods and specifically for circuit-board fabrication.

Keywords

introscopy, X-ray, tomography, computed tomography, digital image, model, printed circuit board, control, C, Matlab

Введение

В последние годы происходит постоянное уменьшение габаритных размеров электронной аппаратуры. Это связано в первую очередь с развитием цифровых технологий. Передовые производители микросхем уменьшают шаг сетки фотошаблонов и увеличивают производительность, при этом задавая тренды всему рынку и создавая конкуренцию. Перед остальными производителями встают важные вопросы повышения качества выпускаемой продукции при сохранении конкуренции, работоспособности и норм прибыли.

Как правило, передовые производители, задающие тон рынку, не экономят на контроле своих изделий, материалов и комплектующих. Отметим, что автоматизированный контроль печатных плат чаще всего проводится на дорогостоящих томографических установках, имеющих возможность сканирования объекта с последующим построением его подробной трехмерной модели [1]. Также такие системы имеют возможность контролировать элементы печатной платы, сравнивая с эталоном, в режиме реального времени. Самым большим преимуществом рассматриваемых установок является возможность восстановления трехмерной формы объекта [2].

Одним из недостатков таких систем контроля является цена (пример цены на комплекс системы томографического контроля можно узнать по запросу у фирмы поставщика, но, как правило, они начинаются от нескольких миллионов рублей).

Исходя из этого, была поставлена задача — исследовать существующие методы реконструкции формы и структуры объекта [3], выявить их преимущества и недостатки относительно имеющейся рентгеновской установки, разработать альтернативный алгоритм реконструкции и, сравнив все методы, выбрать наиболее подходящий. Практическая значимость работы заключается в получении в результате работы реконструкции трехмерной формы и внутренней структуры на экспериментальных массивах данных. Это позволит в последующем проводить реконструкцию массивов данных более крупных размерностей, например, печатных плат с целью проведения автоматизированного контроля.

Снимки объекта получают на системе рентгеновского контроля Nordson DAGE XD7600NT Ruby [4] с цифровой камерой CMOS (разрешение в 1,3 Мегапикселей), обеспечивающей распознавание вплоть до 0,5 мкм. Данную систему используют, как правило, для визуального контроля печатных плат и получают снимки исследуемого объекта в высоком формате. Большая разрешающая способность полученных рентгеновских снимков определяет их качество при дальнейшей обработке и реконструкции. Также возможно томографическое исследование при подключении данной опции (дорогостоящая процедура).

Подход реконструкции объекта по полученным снимкам используется на практике в приборостроении. Однако подчеркнем, что проведение томографического исследования объекта либо является платной опцией к системам рентгеновского контроля, либо уже включено в систему, что влияет на их стоимость.

Исходный код программного обеспечения, которое предоставляется поставщиком при подключении опции томографического исследования, изучить невозможно, следовательно, чтобы провести самостоятельную реконструкцию без подключенной опции, нужно исследовать существующие методы реконструкции формы и внутренней структуры объекта, либо разработать свой алгоритм в рамках поставленной задачи. В этом заключается новизна данной работы.

Первый метод, представленный в работе, основан на использовании библиотеки со строгим набором входных данных в виде параметров установки. Исходя из этого, требовалось разработать алгоритм, который не привязан к типу использованной установки. С целью решения данной задачи реализовывались второй и третий методы.

Представленные методы (как существующие, так и свой алгоритм) нацелены прийти на замену платной опции томографического исследования объекта в рамках поставленной задачи, приведено сравнение проведенных экспериментов, указаны преимущества и недостатки использованных методов и сделаны соответствующие выводы по полученным результатам.

Описание получения формы и структуры объекта с помощью функций библиотеки в среде MATLAB

Рассмотрим первый использованный метод восстановления трехмерной структуры объекта с помощью библиотеки реконструкции. Данная библиотека представлена в виде программы в среде MATLAB

и включает в себя примеры реконструкции рентгеновских изображений и функции, решающие интегральное уравнение Радона при построении срезов объекта [5].

1. Структура библиотеки [6]:

ParamSetting — функция настройки параметров установки (схема установки представлена на рис. 1);

Measurement — сборка, измерение параметров установки [7], входных файлов-снимков в формате

*.MAT и вывод данных для последующей работы;

Reconstruction examples (FDK, MLEM, SART, SQS) [8] — примеры реконструкции изображений.

1.1 Порядок работы с библиотекой:

- получение на рентгеновской установке Nordson DAGE XD7600NT Ruby требуемого количества снимков с разных углов (рис. 2);
- создание из полученных снимков входного файла на обработку в формате *.MAT;
- заполнение параметров установки (рис. 1);
- использование примеров реконструкции [9].

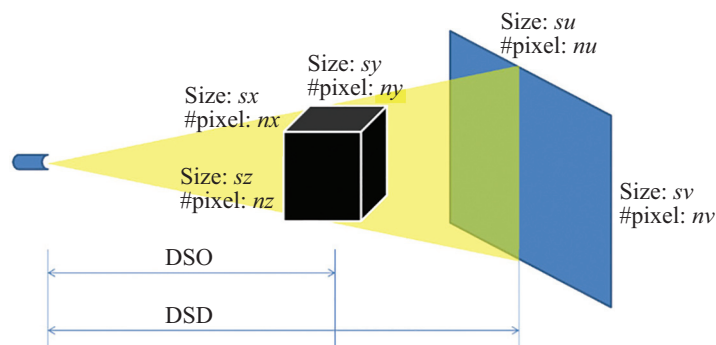


Рис. 1. Параметры установки библиотеки: DSO (Distance, Size, Object — расстояние, размер, объект) — расстояние от источника до середины объекта; DSD (Distance, Size, Detector — расстояние, размер, детектор) — расстояние от источника до детектора; s_x, s_y, s_z — реальные размеры объекта по трем плоскостям x, y, z (мм); n_x, n_y, n_z — размеры вокселей; s_u, s_v — размеры детектора (мм) (в данной работе за детектор была принята разрешающая способность монитора); n_u, n_v — плотность пикселей на мониторе; Size — реальные размеры; #pixel — размеры в пикселях

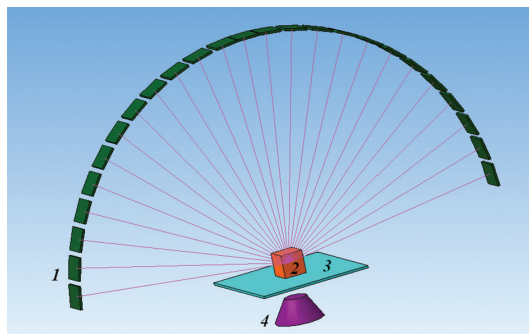


Рис. 2. Схема съемки объекта на рентгеновской установке Nordson DAGE XD7600NT Ruby: 1 — ракурсы, под которыми производится излучение объекта рентгеновской трубкой; 2 — объект исследования; 3 — поворотный стол; 4 — цифровая камера CMOS разрешением 1280×1024 (1,3 Мегапикселей)

Сравнив используемую схему съемки и рекомендуемую для использования с библиотекой, прослеживается заметная разница по нескольким параметрам. Во-первых, известна только разрешающая способность цифровой камеры CMOS, но не реальный размер плоскостельного детектора¹. Во-вторых, требуемые в настройках параметров библиотеки расстояния DSO и DSD узнать также не представлялось возможным из-за перемещений поворотного стола во время изменения угла исследования [10]. Это приводило к установке данного параметра «на глаз» [11].

Полученные массивы данных (набор рентгеновских снимков) были протестированы на примерах реконструкций, идущих в комплекте с библиотекой.

- Алгоритм FDK (Feldkamp, Davis and Kress) [12] является популярным методом аналитической реконструкции для практических конусно-лучевых сканеров. По сравнению с итерационными методами алгоритм является более эффективным. Тем не менее скорость восстановления остается ограниченной при работе с изображениями в высоком разрешении.

¹ Плоскостельные детекторы [Электронный ресурс]. URL: <https://newcom-ndt.ru/ploskopanelnye-detektory>

- Алгоритм MLEM (Maximum Likelihood Expectation Maximization) [12] является оптимизирующим и с помощью интерполяции устраняет артефакты, вызванные несоответствиями в пространстве Радона или синограмме¹.
- Алгоритм SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) [12] – техника одновременной алгебраической реконструкции, преимуществом которой является высокая вероятность реализации реконструкции всего за одну итерацию.
- Алгоритм SQS (Separable Quadratic Surrogate) [12] прост и обновляет все воксели² одновременно, однако требует много итераций для схождения.

После проведения некоторого количества испытаний с тестовыми рентгеновскими снимками, полученными под разными углами, не удалось достигнуть желаемого результата. Возникли проблемы с подгонкой нужных параметров установки, правильной упаковкой в контейнер типа MAT (формат хранения данных в MATLAB [13]) и последующим переполнением памяти ввиду особенностей построения массивов в среде MATLAB. В результате полученные срезы выглядели не должным образом — с большим количеством артефактов и отдаленно напоминали нужную форму.

Для решения данной проблемы предложено вместо использования готовой библиотеки с уже настроенными параметрами под определенный вид установок разработать альтернативный метод восстановления формы и структуры объекта, основанный на переборе пикселей изображений.

Описание получения формы и структуры объекта с помощью математической обработки пиксельных данных цифрового изображения в системе MATLAB

Предлагаемый метод реконструкции трехмерной формы объекта заключается в построении срезов объекта из рентгеновских снимков с помощью перебора пикселей в системе MATLAB [13]. Проводится аналогия с двухмерным распределением плотности (или коэффициента поглощения) c в некоторой плоскости (z -сечении) $c_z(x,y)$ путем решения интегрального уравнения Радона, конструирующего трехмерное распределение $c(x,y,z)$ на основании z -сечений. Однако в данном методе коэффициент поглощения предлагается изначально полностью распределить на расстоянии (z -сечение), равном длине массива, в котором он находится.

Данная операция проводится поэлементно с каждой строкой массива (рис. 3).



Рис. 3. Тестовый одномерный массив данных (упрощенный вид)

Полученное двухмерное распределение (аналогия с z -сечением) представлено на рис. 4. Трехмерное представление распределенных массивов и разница между ними представлены на рис. 5.

Затем значения распределенных массивов предлагается перебирать в цикле до тех пор, пока не произойдет схождение сумм исходных одномерных массивов. Это будет значить, что ненужные элементы распределенных массивов отброшены, а значимые элементы распределили вес между собой.

0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0
0	1/10	5/10	10/10	20/10	20/10	10/10	5/10	1/10	0

Рис. 4. Операция распределения строки

¹ Двухмерное распределение одномерных проекций слоя объекта как функция угла проекции.

² Воксел — элемент объемного изображения, содержащий значение элемента раstra в трехмерном пространстве.

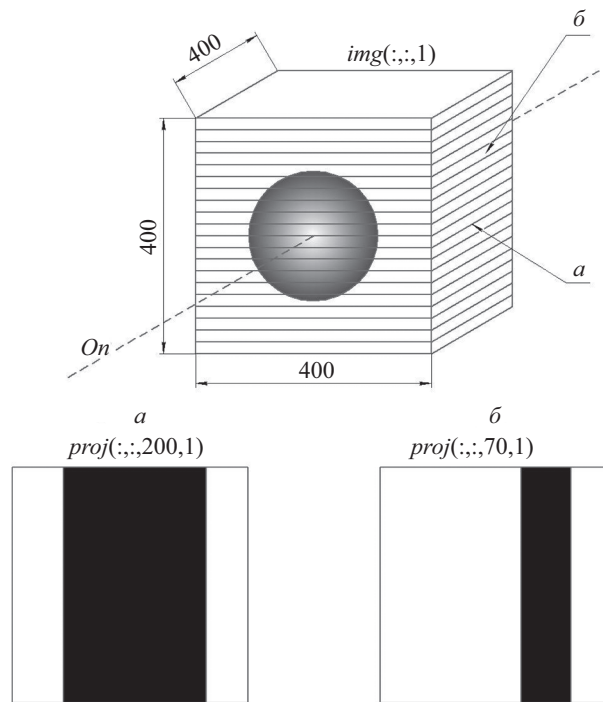


Рис. 5. Снимок, представленный в массиве *img()* и разница между слоями (распределенными одномерными массивами), изъятыми из полученного массива. *On* — луч направления взгляда на массив, *proj* — массив данных после распределения

Для получения сечения в цикле было протестировано два метода.

1. Поворот распределенных массивов строк на требуемый угол (тот, под которым был сделан снимок). Затем заключение в цикл, включающий в себя перебор значений распределенных и развернутых массивов строк до того момента, пока сумма итогового массива не будет равна сумме строки исходного массива изображения, принятой за эталон (среднее значение сумм одной и той же строки всех исходных изображений).

2. Цикл, включающий в себя перебор значений распределенных массивов строк до того момента, пока сумма итогового массива не будет равна сумме строки, принятой за эталон.

Принципиальное различие этих подходов заключается в повороте матриц. Первый подход построен на преобразовании исходной матрицы с помощью матрицы поворота (или матрицы направляющих косинусов), которая используется для выполнения собственного ортогонального преобразования в евклидовом пространстве. При умножении любого вектора на матрицу поворота длина вектора сохраняется. Определитель матрицы поворота равен единице.

Так как мы поворачиваем двухмерные массивы, то будем использовать формулы матрицы поворота для двухмерного пространства [14]. Формула линейного преобразования в декартовой системе координат:

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \pm \sin \theta \\ \pm \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Поворот выполняется путем умножения матрицы поворота на вектор-столбец, описывающий вращаемую точку. Вид новых координат (x', y') в результате поворота точки (x, y) :

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta \pm y \sin \theta, \\ y' &= x \sin \theta + y \cos \theta, \end{aligned}$$

При использовании второго подхода опускается пункт с поворотом распределенных массивов. С одной стороны, задача упрощается — не требуется совмещать трансформированные координаты, также требуется меньше вычислительных мощностей, с другой — усложняется, так как увеличивается время на обработку совмещенных массивов, значения которых накладываются друг на друга. Для сходжения приходится вводить дополнительные коэффициенты, что сказывается на итоговом результате обработки [15].

Описание получения формы и структуры объекта с помощью математической обработки пиксельных данных цифрового изображения с использованием стандартных функций языка программирования Си

Рассмотрим структуру формата цифрового изображения [16]. В основном для открытия, чтения данных и вывода изображения на экран используются специальные функции, но в рассматриваемом случае было решено разработать парсер¹ структуры формата, чтобы получить доступ к необработанным данным изображения на языке Си.

Это было обусловлено следующими причинами:

- сокращение потери данных;
- получение доступа к пиксельным данным изображения;
- получение информации о полной структуре изображения.

Для разбора был выбран формат BMP. Пример разбора, описание и размеры полей структуры представлены в документации к формату.

Реализованный парсер позволил:

- 1) получить доступ к данным без потерь,
- 2) записать их в массив,
- 3) работать с данными по указателю.

Дальнейшая работа с массивом данных проходила аналогично предыдущему подходу в системе MATLAB.

Отметим основные моменты.

В первую очередь массив данных (двухмерное изображение) разбивается по строкам. Двухмерное изображение — набор значений от 0 до 255 (в нашем случае в градациях серого, для тестов были взяты снимки металлического винта с разных углов, рис. 6) в зависимости от яркости, заключенных в матрице размерностью 2×2 (число строк и столбцов соответствует формату изображения).

Затем осуществляется работа с массивом строки. Каждый элемент, имеющий вес, распределяется в двумерной сетке размером, равным длине массива. Операция распределения представляет собой не что иное, как деление значения элемента массива на размер массива (рис. 4, для наглядности представлено в цифрах).

Далее, как и в MATLAB, тестировалось два подхода:

- 1) поворот распределенных массивов строк на требуемый угол и последующее заключение в цикл перебора,
- 2) заключение в цикл перебора без поворота массивов.

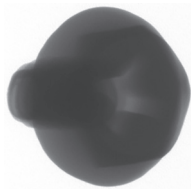


Рис. 6. Рентгеновский снимок металлического винта для тестов (формат 400×400)

Как видно из рис. 7, полученный срез представляет собой диск с участками разной интенсивности. Для получения трехмерной формы и внутренней структуры объекта (винт) требуется наложить полученные срезы друг на друга, используя алгоритмы обратной фильтрации, и применить различные схемы интерполяции [14].



Рис. 7. Пример посрезовой реконструкции объекта винт (вид сверху, формат 400×400)

¹ Парсер (англ. parser; анализ, разбор) — часть программы, преобразующей входные данные в структурированный формат.

Сравнение методов

Наглядное представление о достоинствах и недостатках методов можно получить из представленной по результатам работы таблицы.

Таблица. Сравнение методов реконструкции

Номер метода	Суть метода	Преимущества	Недостатки	Рекомендации
1 метод Получение формы и структуры объекта с помощью функций библиотеки в среде MATLAB	Основывается на прямых и обратных преобразованиях Радона с использованием библиотеки в среде MATLAB	Четко структурированная и проверенная библиотека по реконструкции формы и структуры объекта	1. Отлажена под определенный тип томографических установок; 2. Сложности с заправкой рентгеновских снимков во внутренний формат; 3. Работа с многомерными массивами в MATLAB	1. Начинать работать с малыми массивами данных; 2. Внимательно указывать параметры установки. 3. Установленная система MATLAB (или Octave — opensource). 4. Данный метод лучше применять на установках с вращающимся объектом исследования
2 метод Получение формы и структуры объекта с помощью математической обработки пиксельных данных цифрового изображения в системе MATLAB	Математическая обработка пиксельных данных цифрового изображения в среде MATLAB	Прямое обращение к необработанным данным цифрового изображения без возможной потери при упаковке во внутренний формат MATLAB	1. Работа с многомерными массивами в MATLAB 2. Проблемы с выходом из цикла перебора пикселей; 3. Переполнение памяти	1. Начинать работать с малыми массивами данных; 2. Установленная система MATLAB (или Octave — opensource). 3. Данный метод лучше применять на установках с высоким разрешением камеры
3 метод Получение формы и структуры объекта с помощью математической обработки пиксельных данных цифрового изображения с использованием стандартных функций языка программирования Си	Математическая обработка пиксельных данных цифрового изображения на языке Си	1. Прямое обращение к необработанным данным цифрового изображения; 2. Работа с массивами по указателю	Проблемы с выходом из цикла перебора пикселей	1. Начинать работать с малыми массивами данных. 2. Данный метод самый универсальный

Заключение

Экспериментально проведено исследование всех трех методов, в результате которых возникли некоторые проблемы в основном из-за нехватки памяти. Сложности также возникают при выходе из цикла перебора значений массива, связанного с несовершенством алгоритма построения массивов в цикле, недоработкой условий выхода из цикла и смещением пикселей в новые координаты в случае с поворотом матрицы.

Несмотря на эти затруднения, построен срез объекта для малых экспериментальных (5×5) и средних экспериментальных массивов данных (10×10). Удалось провести необработанную реконструкцию срезов объекта винт (массив данных размерностью 400×400).

Эксперименты, проведенные в ходе работы, показали, что наиболее универсальным и благоприятным для дальнейшей разработки является метод с использованием перебора пиксельных данных рентгеновского изображения с помощью программы, реализованной на языке программирования Си. Такой метод не привязан к типу установки, на которой получены снимки. Язык Си более удобен при работе как с малыми, так и с большими массивами данных. Это позволяет сделать вывод, что данный метод лучше всего справляется с поставленной задачей, и при последующей доработке с применением фильтрации и наложении интерполяции реконструкция трехмерной формы и структуры исследуемого объекта (в перспективе печатной платы) станет возможной.

Литература

1. Арефьева М.В., Сысоев А.Ф. Быстрые регуляризирующие алгоритмы цифрового восстановления изображений // Вычислительные методы и программирование. 1983. № 39.
2. Сизиков В.С. Прямые и обратные задачи восстановления изображений, спектроскопии и томографии с MatLab. СПб: Лань, 2017. 412 с.
3. Грузман И.С. Математические задачи компьютерной томографии // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 5. С. 117–121.
4. Система рентгеновского контроля Nordson DAGE XD7600NT Ruby [Электронный ресурс]. URL: <http://www.a3.spb.ru/services/single/28826> (дата обращения: 12.06.2019).
5. Deans S.R. The Radon Transform and Some of Its Applications. New York: John Wiley & Sons, 1983. 299 p.
6. Kim K. 3D Cone beam CT (CBCT) projection backprojection FDK, iterative reconstruction Matlab examples [Электронный ресурс] URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35548-3d-cone-beam-ct-cbct-projection-backprojection-fdk-iterative-reconstruction-matlab-examples> (дата обращения: 12.06.2019).
7. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1961. 824 с.
8. Krasnow B. DIY X-ray CT scanner controlled by an Arduino [Электронный ресурс]. URL: <https://benkrasnow.blogspot.com/2013/01/diy-x-ray-ct-scanner-controlled-by.html> (дата обращения: 12.06.2019).
9. Natterer F., Wubbeling F. Mathematical Methods in Image Reconstruction. Philadelphia: SIAM, 2001. 215 p.
10. Вайнберг Э.И., Клюев В.В., Курозаев В.П. Промышленная рентгеновская вычислительная томография / В кн. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. 2-е изд. М., 1986. Т. 1.
11. Коткин Г.Л., Черкасский В.С. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием Matlab. Новосибирск: НГУ, 2001. 173 с.
12. Li Y., Dai Y., Duan X., Zhang W., Guo Y., Wang J. Application of automated bronchial 3D-CT measurement in pulmonary contusion complicated with acute respiratory distress syndrome // Journal of X-ray Science and Technology. 2019. (in press) doi: 10.3233/XST-180486
13. Потемкин В.Г. Справочник по Matlab [Электронный ресурс]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/index.php> (дата обращения: 12.06.2019).
14. Физика визуализации изображений в медицине / Под ред. С. Узбба. М.: Мир, 1991. 408 с.
15. Шмаков М. Выбор системы рентгеновского контроля. Взгляд технолога. [Электронный ресурс]. URL: https://www.tech-e.ru/2006_4_60.php (дата обращения: 12.06.2019).
16. Bitmap Storage [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/desktop/gdi/bitmap-storage> (дата обращения: 12.06.2019).

Автор

Смирнов Иван Михайлович — инженер, АО НПК «АТРИ», Санкт-Петербург, 197343, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0394-6884, marasovmarasov@gmail.com

References

1. Aref'eva M.V., Sysoev A.F. Fast regularizing digital image recovery algorithms. *Numerical Methods and Programming*, 1983, no. 39.
2. Sizikov V.S. *Direct and Inverse Problems of Image Restoration, Spectroscopy and Tomography with MatLab*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2017, 412 p. (in Russian)
3. Gruzman I.S. Mathematical problems of computer-aided tomography. *Soros Educational Journal*, 2001, vol. 7, no. 5, pp. 117–121. (in Russian)
4. *X-ray Inspection System Nordson DAGE XD7600NT Ruby*. Available at: <http://www.a3.spb.ru/services/single/28826> (accessed: 12.06.2019).
5. Deans S.R. *The Radon Transform and Some of Its Applications*. New York, John Wiley & Sons, 1983, 299 p.
6. Kim K. *3D Cone beam CT (CBCT) projection backprojection FDK, iterative reconstruction Matlab examples*. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35548-3d-cone-beam-ct-cbct-projection-backprojection-fdk-iterative-reconstruction-matlab-examples> (accessed: 12.06.2019).
7. Lur'e A.I. *Analytical Mechanics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1961, 824 p. (in Russian)
8. Krasnow B. *DIY X-ray CT scanner controlled by an Arduino*. Available at: <https://benkrasnow.blogspot.com/2013/01/diy-x-ray-ct-scanner-controlled-by.html> (accessed: 12.06.2019).
9. Natterer F., Wubbeling F. *Mathematical Methods in Image Reconstruction*. Philadelphia, SIAM, 2001, 215 p.
10. Vainberg E.I., Klyuev V.V., Kurozaev V.P. Industrial X-ray computed tomography. *Devices for Non-Destructive Testing of Materials and Products: a Handbook*. 2nd ed. Moscow, 1986, vol. 1.
11. Kotkin G.L., Cherkasskii V.S. *Computer Simulation of Physical Processes using Matlab*. Novosibirsk, NSU Publ., 2001, 173 p. (in Russian)
12. Li Y., Dai Y., Duan X., Zhang W., Guo Y., Wang J. Application of automated bronchial 3D-CT measurement in pulmonary contusion complicated with acute respiratory distress syndrome. *Journal of X-ray Science and Technology*, 2019. (in press) doi: 10.3233/XST-180486
13. Potemkin V.G. *Matlab Handbook*. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/index.php> (accessed: 12.06.2019).
14. *The Physics of Medical Imaging*. Eds. S. Webb. Bristol, IOP Publ., 1988.
15. Shmakov M. *The choice of x-ray control system. Technologist's view*. Available at: https://www.tech-e.ru/2006_4_60.php (accessed: 12.06.2019).
16. Bitmap Storage. Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/desktop/gdi/bitmap-storage> (accessed: 12.06.2019).

Author

Ivan M. Smirnov — engineer, AO RPC ATHREE, Saint Petersburg, 197343, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0394-6884, marasovmarasov@gmail.com