

Генерация эталонных входных данных для алгоритма автоматической вертикальной сшивки изображений КТ

Выполнил:

студент 4 курса группы Б05-931

Киселев Егор Львович

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Полевой Дмитрий Валерьевич

Москва — 2022

Оглавление

Оглавление	2
Введение	3
Постановка задачи.....	4
Моделируемые искажения.....	5
Входные данные.....	5
Выходные данные.....	5
Реализация.....	6
Получение параметров генерации.....	6
Получение параметров аналитической модели.....	7
Построение разбиения.....	7
Смещение аналитической модели.....	8
Поворот аналитической модели.....	8
Изменение интенсивности аналитической модели.....	8
Построение проекций частей модели.....	9
Наложение шума.....	9
Реконструкция.....	9
Сохранение реконструкций.....	10
Результаты.....	11
Демонстрационные модели.....	13
Ресурсы.....	15
Литература.....	16

Введение

Задача рентгеновской компьютерной томографии (КТ) состоит в неинвазивном исследовании внутренней структуры объекта путем его виртуальной трехмерной реконструкции на основании данных полученных при сканировании. В отличие от традиционной рентгенографии, которая позволяет увидеть лишь одну из теневых проекций, КТ предоставляет возможность исследования ряда сечений без теневых наложений и геометрических искажений.

Томограф включает в себя источник рентгеновского излучения (рентгеновскую трубку) и детектор. Система трубка-детектор вращается вокруг исследуемого объекта (или наоборот, объект вращается в области видимости детектора), регистрируя множество рентгеновских снимков (проекций) одного или сразу нескольких слоев объекта под разными углами с заданным шагом. Массив данных проекций одного слоя будем называть *синограммой* этого слоя. После чего, решается *задача томографической реконструкции*, то есть на основании проекций восстанавливается изображение среза. *Реконструкцией* будем называть набор срезов, полученных путем томографической реконструкции и образующих трехмерный объем, содержащий данные о внутренней структуре исследуемого объекта.

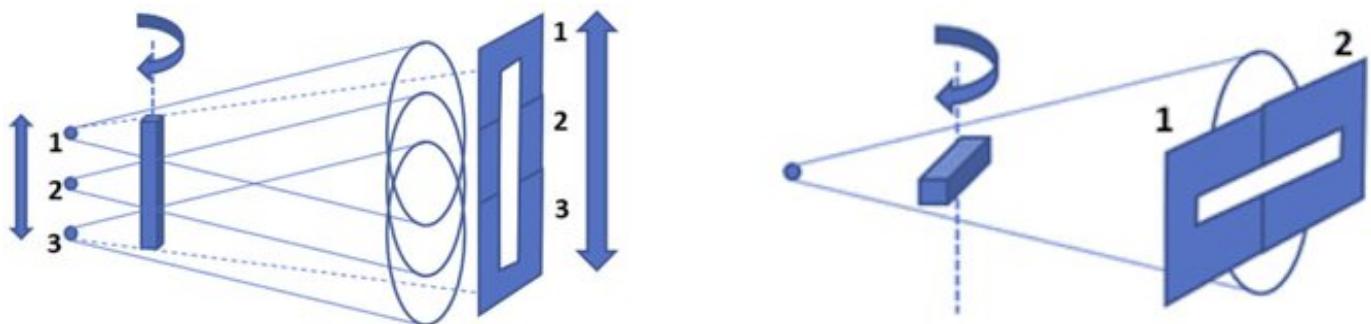


Рисунок 1. Стековое и тайловое сканирование

Современные медицинские КТ-сканеры способны охватить все тело человека одним непрерывным снимком. Однако при исследовании объектов, имеющих большие габариты или при необходимости получения детальных снимков высокого разрешения [1,2], объект может не помещаться целиком в область сканирования томографа. В этом случае возникает необходимость сканирования объекта по частям и последующей сшивки отдельных реконструкций в одну. Снимки выполняются попеременно с вертикальным смещением объекта или системы трубка-детектор (см. Рисунок 1). Таким образом получают несколько реконструкций покрывающих весь исследуемый объект с небольшим перекрытием между ними. От ширины наложения соседних реконструкций зависит качество их последующей сшивки. При этом, в условиях реальной КТ из-за возникающих шумов и артефактов слои перекрывающихся частей соседних реконструкций не являются абсолютно идентичными. Более того, могут возникать смещения оси вращения при перемещении объекта от снимка к снимку.

Полученные реконструкции объединяются с помощью специального *алгоритма вертикальной сшивки* (см. [7]), задача которого заключается в выравнивании реконструкций относительно друг друга, как можно более точном определении перекрывающихся слоев соседних реконструкций и последующем объединении их в единую непрерывную реконструкцию (см. Рисунок 2).

Вертикальной сшивкой двух последовательных по высоте и независимо построенных томографических реконструкций одного объекта в виде воксельных объемов размера $X \times Y \times Z$ с некоторым перекрытием *overlay* будем называть процесс выравнивания реконструкций относительно друг друга, определение области их пересечения и объединение их в одну непрерывную

реконструкцию размера $X \times Y \times (2Z - overlay)$. Аналогично задача сшивки обобщается на произвольное число реконструкций.

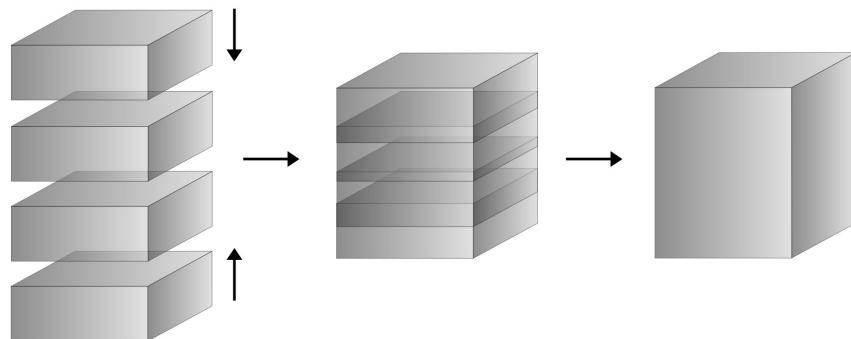


Рисунок 2. Схематическое изображение вертикальной сшивки

Постановка задачи

Задача состоит в генерации входных данных для алгоритма вертикальной сшивки изображений КТ (см. [7]) путем имитации процесса стекового сканирования. Эти данные представляют собой набор вертикально смежных реконструкций частей объекта и могут быть как идеальными, так и с различнымиискажениями для имитации реконструкций, максимально приближенных к реальным.

Можно выделить следующие основные этапы:

1. Получение параметров генерации
2. Получение параметров аналитической модели
3. Построение разбиения
4. Смещение аналитической модели
5. Наклон/поворот аналитической модели
6. Изменение интенсивности аналитической модели
7. Построение проекций частей модели
8. Наложение шума
9. Реконструкция
10. Сохранение реконструкций

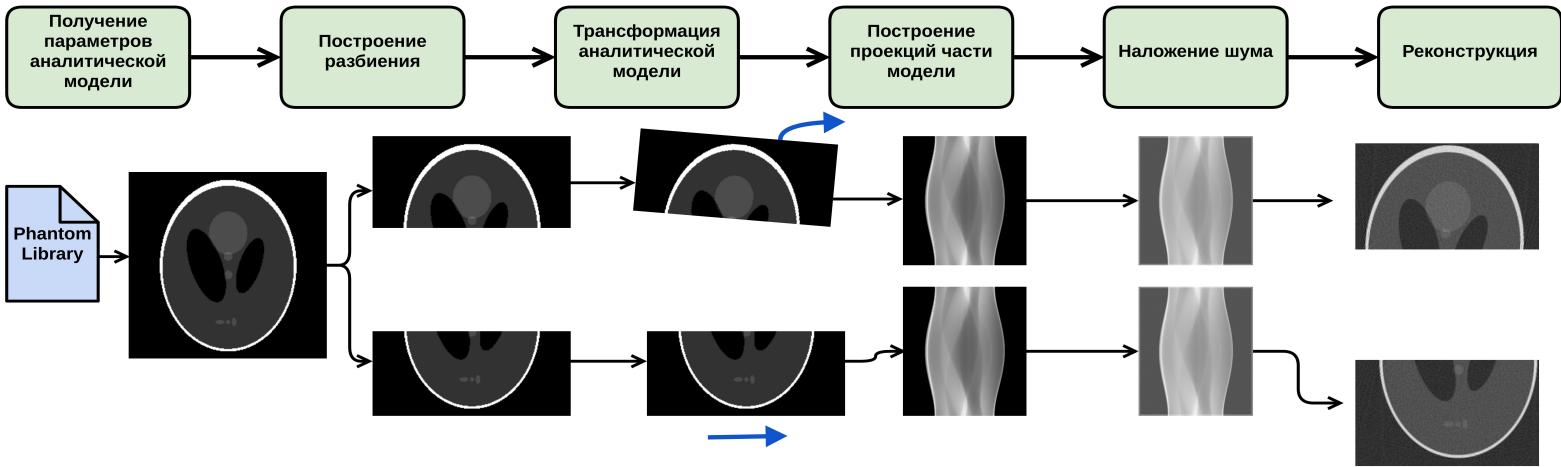


Рисунок 3. Схема генерации реконструкций

Моделируемые искажения

Геометрические:

- **Смещение оси вращения** — небольшой случайный сдвиг в аксиальной плоскости,
- **Наклон оси вращения** — небольшой случайный поворот в сагиттальной и фронтальной плоскостях,
- **Поворот оси вращения** — небольшой случайный поворот в аксиальной плоскости.

Физические:

- **Зашумление** — квантовый шум, обусловленный случайнм распределением фотонов и проявляющийся в виде хаотичного зернистого шума,
- **Изменение интенсивности** — различия в яркости отдельных реконструкций, обусловленные небольшими отклонениями в интенсивности излучения рентгеновской трубы от снимка к снимку.

Входные данные

Конфигурационный файл, содержащий параметры генерируемых реконструкций (см. примеры в папке [demos](#)). Подробное описание параметров см. [Таблица 1](#).

Выходные данные

Набор из `parts_num` реконструкций. Каждая реконструкция представляет собой набор из M монохромных изображений с форматом пикселей `format` в формате `TIFF` и файл с параметрами реконструкции в формате `JSON` (см. [описание параметров](#)). Каждое изображение хранит один аксиальный срез трехмерной реконструкции.

Реализация

Для генерации трёхмерных фантомов будем использовать пакет [TomoPhantom](#) [2].

Для реконструкции снимков – [ToMoBar](#) [3].

Для сохранения изображений слоев - [OpenCV](#) [4].

Получение параметров генерации

Файл конфигурации содержит параметры, описанные ниже (см. Таблица 1). Парсинг и хранение параметров осуществляются в классе [Parameters](#).

Имя	Описание	Значение
Параметры модели		
models_lib	Адрес библиотеки 3D фантомов	str
model	Номер модели в библиотеке	uint
Параметры разбиения (см. Рисунок 5)		
height	Высота цельной реконструкции всей модели	uint
depth	Глубина реконструкции	uint
width	Ширина реконструкции	uint
parts_num	Количество реконструкций	uint
overlay	Толщина перекрытия соседних реконструкций	uint
Параметры сканирования		
angles_num	Количество углов с которых регистрируются проекции	uint
angles_step	Шаг между углами	float
Параметры искажений		
seed	Сид для псевдослучайных искажений	uint
is_noisy	Нужно ли накладывать шум	bool
noise_amplitude	Интенсивность шума	float
is_offset	Нужно ли делать случайные смещения относительно оси	bool
max_offset	Максимальное смещение относительно оси	float
is_tilted	Нужно ли делать случайные наклоны относительно оси	bool
max_tilt	Максимальный наклон относительно оси	float
is_intensity_vary	Нужно ли делать случайные отклонения интенсивности	bool
max_intensity_variation	Максимальное отклонение интенсивности	float
Параметры изображений		
save_path	Адрес сохранения реконструкций	str
format	Формат изображений { .tiff, .png, ... }	str
type	Формат пикселей <code>{ uint8, uint16, uint32, int8, int16, int32, float32 }</code>	str

Таблица 1. Параметры генерации

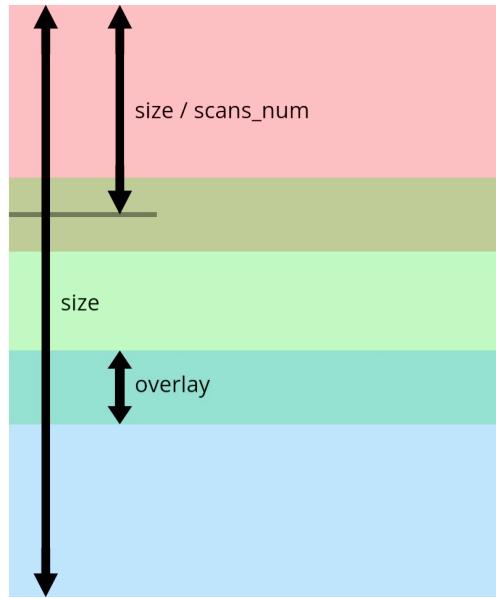


Рисунок 4. Схема разбиения

Получение параметров аналитической модели

Аналитическая модель представляет собой набор трехмерных геометрических примитивов с заданными параметрами положения в пространстве, размера, поворота и интенсивности. Модель описывается в соответствии с форматом, используемым в библиотеке *TomoPhantom* (Подробное описание формата см. в [документации](#)).

В коде генератора модель представлена классом `TomoP3DModel` и хранится в виде набора объектов, представленных `TomoP3DObject`. Класс модели предоставляет интерфейс для трансформации (смещение, поворот) и построения синограмм. Модель может быть прочитана из файла соответствующего формата (см. примеры в папке `models`).

Построение разбиения

Независимо от того какие реконструкции будем генерировать (идеальные, шумные или др.), сначала необходимо сформировать *разбиение* цельного объема на части с перекрытием. То есть массив пар индексов срезов начала и конца каждой части в цельной реконструкции. Для этого разобьем высоту реконструкции `height` на `parts_num` частей и в каждой точке разбиения отступим по (`overlay / 2`) в обе стороны (см. Рисунок 3), полученные индексы (включая 0 и `height`) и будут искомым разбиением.

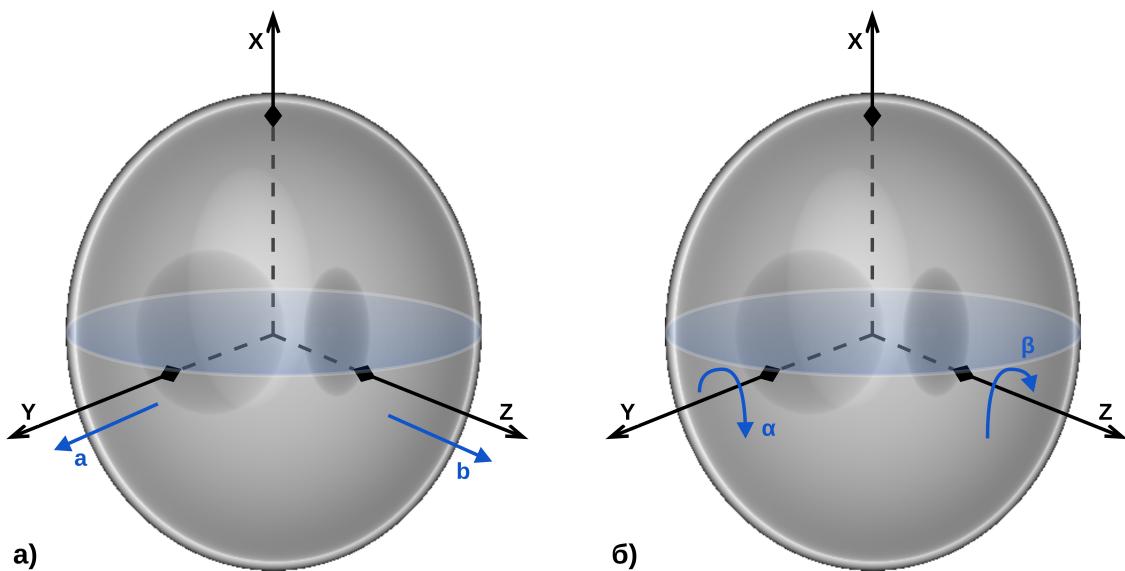


Рисунок 5. а) Смещение аналитической модели, б) Наклон аналитической модели

Смещение аналитической модели

Если требуется смещение оси вращения (`is_offset==True`), то сначала генерируем список пар случайных смещений (a, b) в пределах $[-\text{max_offset}, \text{max_offset}]$ размера `parts_num`. Затем, перед построением проекций каждой из частей производим сдвиг исходной аналитической модели с помощью функции [`TomoP3DModel::move`](#) в соответствии со сгенерированным вектором смещения в аксиальной плоскости (см. Рисунок 6 (а)), путем сдвига всех ее объектов с помощью функции [`TomoP3DObject::move`](#).

Поворот аналитической модели

Если требуется наклон оси вращения (`is_tilted==True`), то сначала генерируем список пар случайных углов наклона (α, β) (в градусах) в пределах $[-\text{max_tilt}, \text{max_tilt}]$ размера `parts_num`. Затем, перед построением проекций каждой из частей производим наклон исходной аналитической модели с помощью функции [`TomoP3DModel::rotate`](#) в соответствии со сгенерированным вектором углов Эйлера, задающих повороты в сагиттальной и фронтальной плоскостях (см. Рисунок 6 (б)), путем поворота всех ее объектов относительно начала координат с помощью функции [`TomoP3DObject::transform`](#).

Изменение интенсивности аналитической модели

Если требуется изменение интенсивности (`is_intensity_vary==True`), то сначала генерируем список случайных отклонений интенсивности в пределах $[-\text{max_intensity_variation}, \text{max_intensity_variation}]$ размера `parts_num`. Затем, перед построением проекций каждой из частей производим изменение интенсивности исходной аналитической модели с помощью функции [`TomoP3DModel::variate_intensity`](#) в соответствии

со сгенерированным вектором отклонений путем изменения интенсивности всех ее объектов с помощью функции [TomoP3DObject::variate intensity](#).

Построение проекций частей модели

Далее необходимо сымитировать процесс стекового сканирования модели, построив несколько наборов синограмм для каждой части в соответствии с разбиением. Для построения синограмм используется функция `TomoP3DObjectSino_core` из `TomoPhantom`, позволяющая получить проекции нужной части модели (по высоте) с заданных `angles_num` углов.

Наложение шума

Если требуется зашумление (`is_noisy==True`), то на полученные наборы синограмм независимо накладываем Пуассоновский шум, с заданной интенсивностью `noise_amplitude` (см. Рисунок 7). Для генерации шума используется [std::poisson_distribution](#) из `random`.

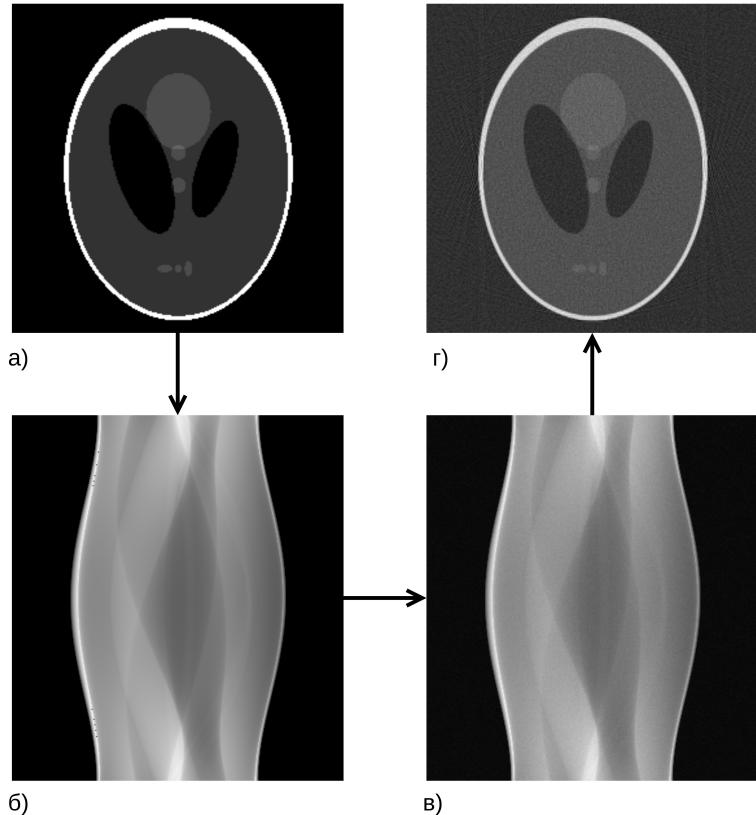


Рисунок 6. а) Один из срезов исходной модели, б) Синограмма этого среза, в) Синограмма с наложенным Пуассоновским шумом интенсивности 10^4 , г) Срез реконструированного снимка

Реконструкция

Полученные проекции каждой из частей объекта записываются в виде набора из `angles_num` изображений, для дальнейшей их передачи в [реконструирующий скрипт](#), написанный на `Python`.

Реконструкция производится методом FBP (Filtered Back Projection) из библиотеки *ToMoBAR*. Скрипту передаются необходимые параметры проекций:

- Путь к файлам проекций,
- Размер сканируемого объекта (определяется его высотой `height`),
- Количество частей (`parts_num`),
- Количество углов сканирования (`angles_num`),
- Шаг между углами (`angles_step`),
- Путь сохранения реконструкций.
- Эталонные параметры сшивки: разбиение, смещения, наклоны, отклонения интенсивностей

Этот же скрипт выполняет обрезку реконструкций по ширине и глубине, если таковая требуется (то есть, если `width ≠ height` или `depth ≠ height`) и сохраняет их, согласно описанному ниже формату.

Сохранение реконструкций

В директории по заданному адресу `save_path` каждая из смоделированных реконструкций набора сохраняется в одну из `parts_num` директорий пронумерованных начиная с нуля (см. *Рисунок 8*). В этой же директории создается общий JSON-файл описания набора реконструкций (см. [описание](#)).

Одна реконструкция представляет собой трехмерный массив размера $X \times Y \times Z$ с типом данных `float`. Если заданный тип выходных данных `type` является целочисленным (`type ≠ float`), то перед сохранением необходимо сначала преобразовать реконструкцию к этому типу данных. Для этого линейно растянем/сожмем диапазон значений вокселей до диапазона типа `type` и приведем полученные значения к целым с округлением вниз.

Затем реконструкция послойно записывается в Z изображений формата `format` с типом данных `type` размера $X \times Y$. Также в директории с изображениями создается JSON-файл с параметрами сохраняемой реконструкции (см. [описание](#)).

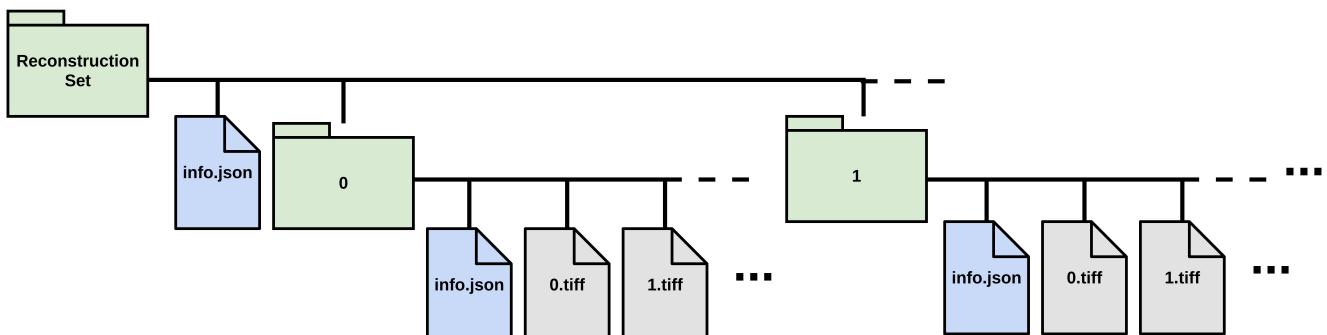


Рисунок 7. Структура хранения набора реконструкций

Результаты

Текущая версия позволяет генерировать набор реконструкций с произвольным разбиением и искажениями смещения и наклона оси и зашумления (см. Рисунок 8 и Рисунок 9).

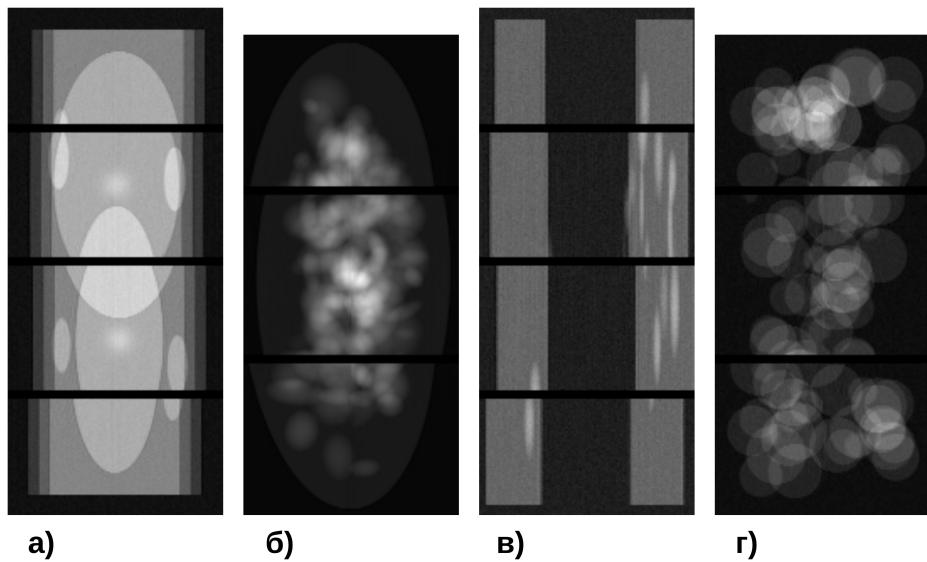


Рисунок 8. Срезы демонстрационных реконструкций: а) 4 части, шум, смещение б) 3 части, смещение, наклон в) 4 части, шум, смещение г) 3 части, шум, смещение, наклон

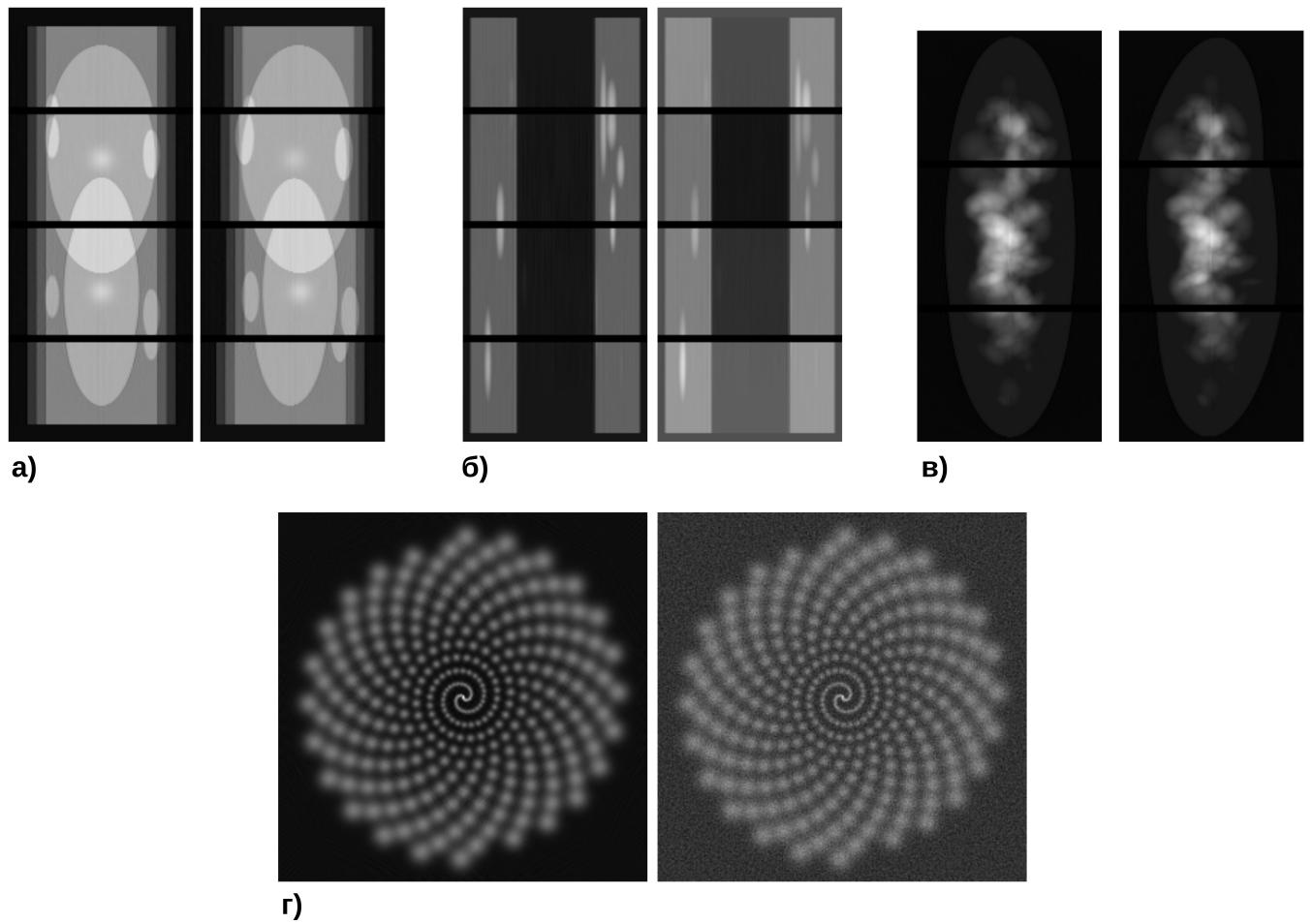


Рисунок 9. Примеры искажений: а) Смещение б) Изменение интенсивности в) Наклон г) Шум

Ограничения:

В силу ограничений библиотеки *TomoPhantom* поворот объектов параллелепипедов (`cuboid`) и цилиндров (`elliptical_cylinder`) не поддерживается. А следовательно и наклон моделей, содержащих эти объекты невозможен.

Зависимости:

- Python >3.5
- CMake >3.5 [1]
- TomoPhantom [2]
- ToMoBAR [3]
- OpenCV [4]

Сборка:

```
cd stacked-tomoscan-gen  
mkdir build  
cd build  
cmake ..  
make
```

Использование:

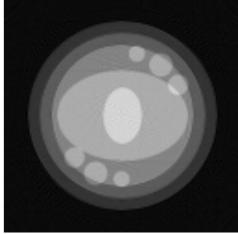
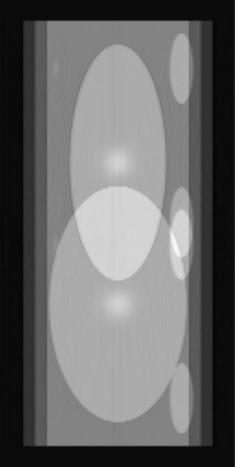
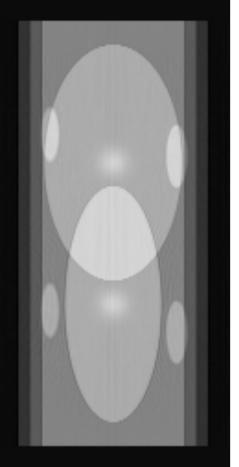
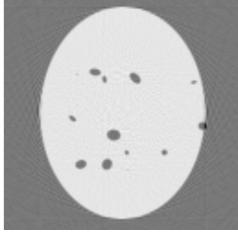
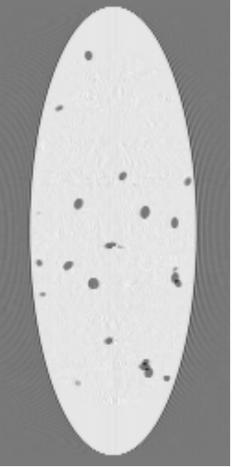
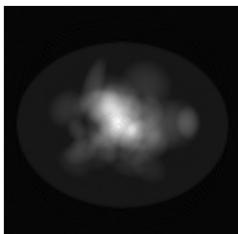
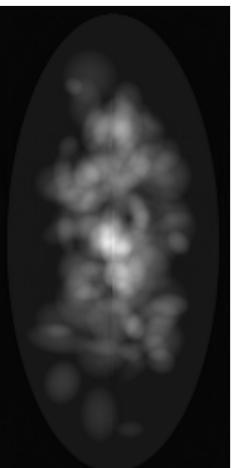
```
./strg <config_file>
```

Параметры генерации задаются в конфигурационном файле специального формата. Файл должен содержать параметры, описанные в *Таблице 1*.

Примеры конфигурационных файлов можно найти в папке [demos](#). Демонстрационные модели описаны в файле [models/CustomPhantom3DLibrary.dat](#). Построение демонстрационных реконструкций:

```
./strg ../demos/cylinder.config  
./strg ../demos/pores.config
```

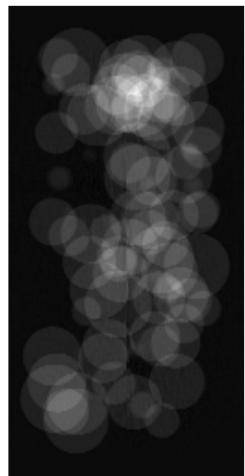
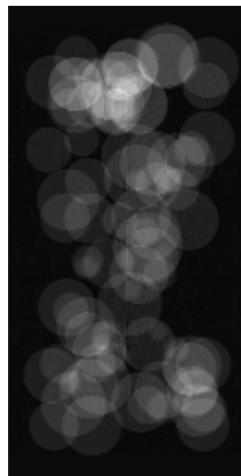
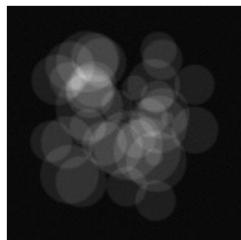
Демонстрационные модели

Номер модели в библиотеке Название модели Файл конфигурации	Изображение среза		
	Аксиальный	Сагittalный	Фронтальный
1 «Цилиндр» cylinder.config			
2 «Пористый эллипсоид» pores.config			
3 «Неоднородный эллипсоид» nonuniform.config			

4

«Цилиндр из шаров»

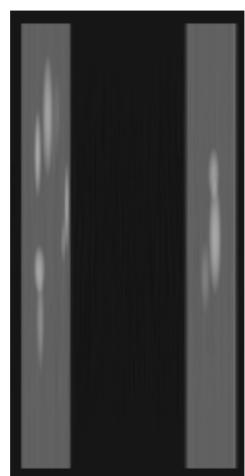
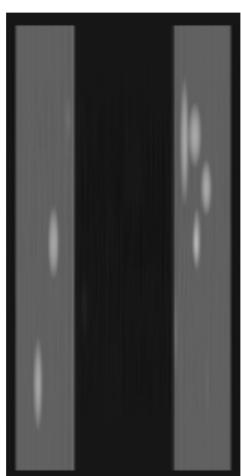
cylinder_of_bubbles.config



5

«Волокна»

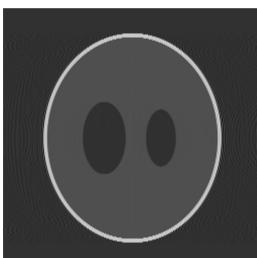
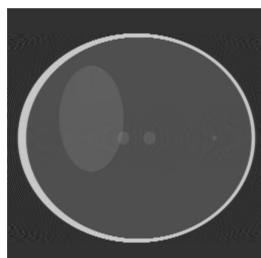
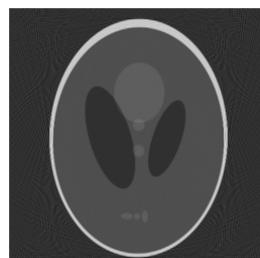
fibers.config



6

«Шепп-Логан»

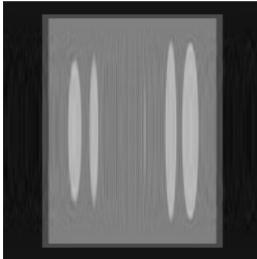
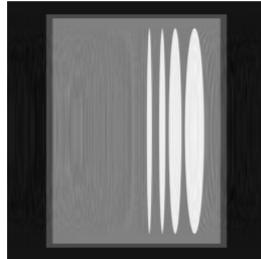
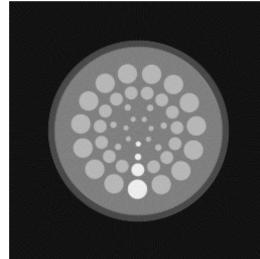
shepp-logan.config



7

«Столбцы»

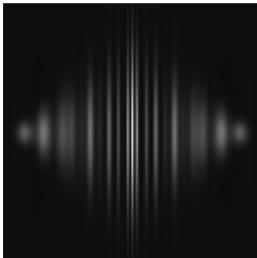
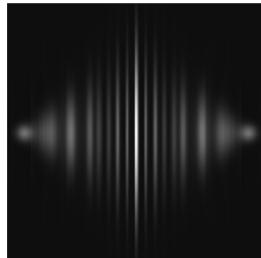
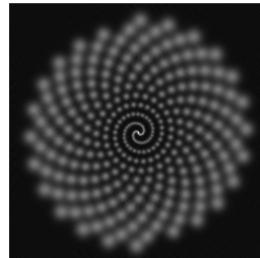
columns.config



8

«Горизонтальные спирали»

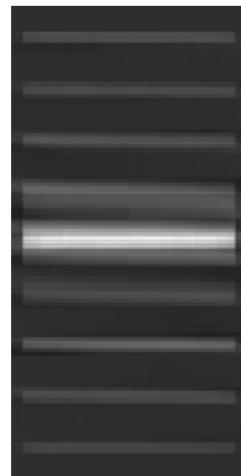
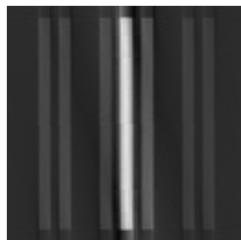
spirals_horizontal.config



9

«Вертикальные спирали»

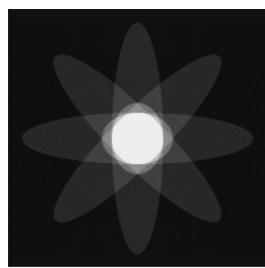
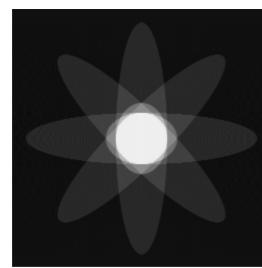
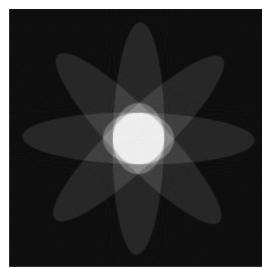
spirals_vertical.config



10

«Шипы»

spikes.config



Ресурсы

1. CMake - <https://cmake.org/>
2. TomoPhantom - <https://github.com/dkazanc/TomoPhantom>
3. ToMoBAR - <https://github.com/dkazanc/ToMoBAR>
4. OpenCV - <https://opencv.org/>
5. Документация - <https://egor79k.github.io/stacked-tomoscan-gen/html/index.html>
6. Репозиторий - <https://github.com/egor79k/stacked-tomoscan-gen/>
7. Репозиторий алгоритма сшивки - https://github.com/egor79k/vertical_stitching

Литература

1. FleXCT: a Flexible X-ray CT scanner with 10 degrees of freedom / De Samber, Björn [и др.] // Optics Express. 29. 10.1364/OE.409982, 2021.
2. Integrating expert feedback on the spot in a time-efficient explorative CT scanning workflow for cultural heritage objects / F. Bossema [и др.] // Journal of Cultural Heritage. 49. 10.1016/j.culher.2021.03.004, 2021.
3. Image Noise in Radiography and Tomography: Causes, Effects and Reduction Techniques / E.N. Manson [и др.] // Curr Trends Clin Med Imaging 3, 4, 2019. — 86-91 с.
4. C. Kaethner. Determining Noise Distribution in Computed Tomography – A Simple Phantom Based Approach / C. Kaethner, J. Müller, T.M. Buzug // Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik, vol. 57, 2012.