

Виртуальный конвейер генерации данных для анализа методов компьютерной томографии

П.С. Чикин^I, Ж.В. Солдатова^{I,II}, А.С. Ингачева^{I,II}, Д.В. Полевой^{I,II,III}

^I ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия

^{II} Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, г. Москва, Россия

^{III} Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются практические вопросы использования компьютерной томографии в задачах неразрушающего контроля для оценки геометрических параметров объектов в промышленности и лабораторных исследованиях. Обзор источников показал, что большинство опубликованных работ опирается на закрытые данные, что существенно затрудняет проведение научных исследований в части воспроизведения результатов и сравнения различных методов томографической реконструкции и анализа реконструированных данных. В качестве решения этой проблемы предложено использовать численное моделирование с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом. Предложена оригинальная схема виртуального конвейера генерации тестовых данных. Программная часть конвейера реализована в виде набора python-скриптов, проведены численные эксперименты.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, рентгеновская компьютерная томография, компьютерная симуляция.

DOI: 10.14357/20790279240406 **EDN:** CZKONZ

Введение

Рентгеновская компьютерная томография (КТ) является методом неразрушающего исследования внутренней структуры объектов [1-3] и широко используется в промышленности и научных исследованиях. При наличии большого количества работ посвященных особенностям практического применения КТ для неразрушающего контроля (НК) [4], практически отсутствуют публично доступные данные, что затрудняет воспроизведение результатов и сравнение различных алгоритмов. Дополнительную значимость тематике симуляционной генерации КТ данных придают успехи методов искусственного интеллекта в задачах КТ реконструкции и анализа [5-9], что требует все больше данных для обучения и тестирования. При этом во многих прикладных областях именно симуляционные данные становятся серьезным драйвером развития. Примером могут служить разработки робототехнических систем [10,11] или методы оптического распознавания текстовых фрагментов документов, для обучения

которых используются полностью синтетические данные [12,13].

Эта работа является первым шагом в сторону формирования виртуального конвейера симуляционной генерации тестовых данных с открытым исходным кодом для исследований методов КТ и анализа его результатов реконструкции, частности, сравнения с эталонными векторными описаниями.

1. Обзор

1.1. Компьютерная томография для промышленного неразрушающего контроля

Контроль качества геометрии изделий — это процесс проверки соответствия геометрических параметров изделия установленным требованиям и стандартам. Он направлен на проверку линейных размеров, углов, радиусов и других геометрических параметров для обеспечения точности размеров, формы и расположения частей, что обеспечивает надлежащую функциональность изделия.

Ранее контроль осуществляли обученные специалисты при помощи специальных механических и оптических приборов, что нередко приводило к ошибкам из-за отсутствия автоматизации.

На современном этапе промышленного развития наиболее технологичным вариантом проведения контроля геометрических характеристик является использование координатно-измерительных машин (КИМ). Они обеспечивают высокую точность и автоматизацию процесса измерений внешних размеров, но не могут проводить измерения «внутри» объекта. Измерения внутренней геометрии требуются для объектов сложной формы, например, при наличии технологических каналов, а также при контроле качества сборки. На сегодняшний день проводить измерения параметров внешней и внутренней геометрии объекта в целях неразрушающего контроля возможно только с использованием методов томографической реконструкции в том числе с использованием КТ. Еще одним преимуществом использования томографии является возможность одновременно с геометрией контролировать качество материалов, поскольку позволяет выявлять трещины, пустоты, посторонние включения и т.п. неоднородности материалов в уже готовом изделии.

Суть метода КТ состоит в получении проекционных изображений исследуемого объема для многих ракурсов с последующим восстановлением пространственного распределения поглощения в виде воксельного объема. На качество реконструированного воксельного объема [1,4,14] влияет большое количество факторов: несовершенство оборудования, ошибки измерений, случайная природа физических процессов, лежащих в основе метода КТ, отклонение реальных процессов от реализованных математических моделей, огрубление вычислений для получения приемлемых по вычислительной сложности алгоритмов, ошибки в программном обеспечении и т.д. Отклонения воксельного объема от некоторого «идеала» называются артефактами реконструкции. Одним из важных артефактов с точки зрения использования результатов КТ для измерения геометрических размеров объектов является размытие точной границы между различными материалами из-за неточности источника или не достаточной параллельности пучка.

Большинство артефактов КТ является принципиально неустранимыми, но степень их выраженности и влияния на результаты анализа может сильно различаться, поэтому разработка более точных и робастных методов КТ реконструкции, а также более устойчивых к наличию артефактов

методов анализа остается актуальной и в настоящее время.

1.2. Обзор основных методов получения изоповерхостей

Описание большого количества различных физических тестовых объектов (ТО) и процедур анализа метрологических показателей и воспроизводимости измерений с использованием КТ можно найти в обзоре [4].

Для построения поверхности объекта значения вокселей реконструированного объема рассматриваются как значения скалярного поля в узлах решетки и для такого поля строятся изоповерхности. Стандартным вариантом метод выбора порогового значения для выделения границы является ISO50 [15], когда пороговое значение вычисляется как среднее между значениями соответствующих разделяемым материалам локальных максимумов на гистограмме яркости. К настоящему времени разработано много различных методов построения изоповерхностей, описание которых можно найти в обзоре [16]. При этом отметим, что задача построения изоповерхностей остается актуальной [17,18] и нет одного «общепринятого» лучшего метода. Недостаток открытых данных для проведения научных исследований и сравнения методов в контексте задач НК остается насущной проблемой, а моделирование может частично такой недостаток компенсировать.

1.3. Представления/описания объектов

В системах автоматизированного проектирования (САПР) или CAD (computer-aided design) используется довольно сложная и разнообразная классификация видов описаний, к основным из которых можно отнести:

- твердотельное (solid) в виде набора геометрических 3d-примитивов и дерева операций типа объединение/пересечение;
- сплайновое или поверхностное (surface) в виде сплайновых моделей;
- проволочное или полигональное в виде полигональных сетей (3d-mesh), состоящих из вершин и ребер их соединяющих.

Далее в качестве векторного описания будет рассматриваться проволочное представление. Особенности использования других представлений планируется рассмотреть в будущих исследованиях.

Использование результатов КТ для НК опирается на построение векторной модели из объема. В простом случае результат представляется проволочной моделью, которая геометрически совмещается оптимальным способом с поверхностью, соответствующей САПР-модели. Далее для анализа

отклонений используются визуализации в виде тепловых карт, а также численные показатели статистик и экстремальных значений расстояний между поверхностями.

В более сложном варианте после совмещения производится оценка параметров заданных САПР-моделью контролируемых поверхностей (плоскость, цилиндр, шар и т.п.), после чего анализируется степень соответствия найденных параметров модельным.

2. Общая схема и протокол виртуального эксперимента

2.1. Математическая модель виртуального конвейера для исследования точности

По результатам публикаций [4,19] эксперименты по анализу методов измерений геометрических размеров при помощи КТ могут быть описаны следующей последовательностью:

1. создание эталонного векторного описания (САПР-модель);
2. создание физического ТО и измерение его геометрических параметров при помощи КИМ;
3. получение воксельного объема путем КТ-сканирования и реконструкций;
4. векторизация воксельного объема;
5. оценка геометрических параметров по результатам п.4 и сравнение с измерениями п.2.

Виртуальный конвейер моделирует п.2-3, при этом результаты его работы используются для расчета оценок из п.5 в сравнении с модельными значениями из п.1.

Схема виртуального конвейера генерации тестовых данных для анализа методов компьютерной томографии в задачах неразрушающего контроля представлена на рис. 1. При этом используются следующие обозначения:

M_O – векторная модель ТО в эталонном положении (САПР-модель);

$\mathcal{G}(\cdot)$ – прямое эталонное геометрическое преобразование;

$M_G = \mathcal{G}(M_O)$ – векторная модель ТО в общем положении;

$\mathcal{V}(\cdot)$ – вокселизация векторной модели;

$\mathcal{V}^{-1}(\cdot)$ – векторизация воксельного объема;

$V_G = \mathcal{V}(M_G)$ – воксельный объем;

$\mathcal{R}(\cdot)$ – повышение реалистичности;

$V_R = \mathcal{R}(V_G)$ – воксельный объем (реконструированный);

$M_R = \mathcal{V}^{-1}(V_R)$ – векторная модель ТО по результатам реконструкции;

$\mathcal{G}^{-1}(\cdot)$ – обратное эталонное геометрическое преобразование;

$M_R^G = \mathcal{G}^{-1}(M_R)$ – векторная модель ТО после обратного геометрического преобразования;

$\mathcal{G}_{M_O}^A(\cdot)$ – автоматическое совмещение векторных моделей;

$M_R^A = \mathcal{G}_{M_O}^A(M_R)$ – автоматически совмещенная векторная модель ТО.

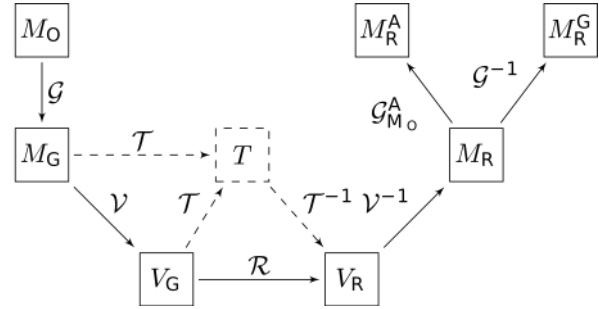


Рис. 1. Схема конвейера

В дальнейшем планируется расширение конвейера за счет инструментов моделирования КТ сканирования [20,21], которые строят набор проекционных изображений T прямым проецированием $\mathcal{T}$ для векторной модели ($T = \mathcal{T}_M(M_G)$) или воксельного объема ($T = \mathcal{T}_V(V_G)$). Тогда реконструированный воксельный объем является результатом КТ реконструкции $\mathcal{T}^{-1}(V_R = \mathcal{T}^{-1}(T))$.

2.2. Детали реализации

Система координат (СК) задается правой тройкой единичных векторов. Центр СК совпадает с геометрическим центром ТО в начальном положении. Рабочим считается кубический объем со стороной $2L$, центр куба совпадает с центром системы координат. Без ограничения общности считаем воксели кубическими элементами объема с длиной ребра a . Воксельный объем рассматривается как значения функции яркости в узлах кубической решетки, геометрически размещенных в центрах вокселей.

Расстояние между векторными моделями M_1 и M_2 определяется, как расстояние Хаусдорфа:

$$d_H(M_1, M_2) = \max(\sup_{p_1 \in P_1} d(p_1, M_2), \sup_{p_2 \in P_2} d(p_2, M_1)),$$

где P_1 и P_2 – множество вершин M_1 и M_2 , а расстояние от точки до поверхности вычисляется по формуле:

$$d(p, M) = \inf_{q \in M} \|q - p\|,$$

где p – вершина, от которой вычисляется расстояние до 3d mesh модели M , $p, q \in \mathbb{R}^3$.

Для анализа результатов далее используются нормированные на размер вокселя расстояния

$$\begin{aligned} d^{rel} &= a^{-1}d; \\ d_H^{rel} &= a^{-1}d_H. \end{aligned}$$

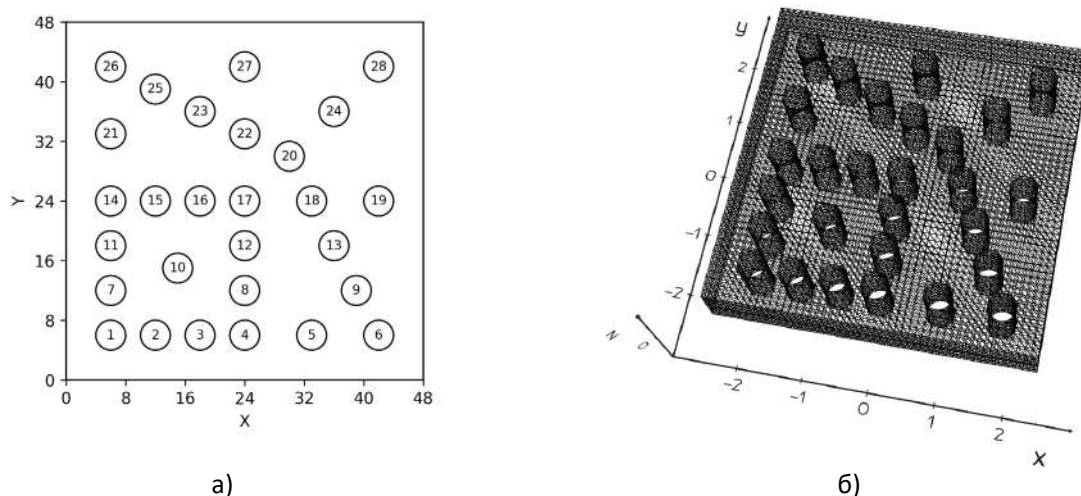


Рис. 2. Тестовый объект hole plate PTB A12: а) схема геометрических размеров и нумерации отверстий, адаптировано из [23]; б) визуализация векторной модели ТО

3. Эксперименты

Для программной реализации используется программное обеспечение с открытым исходным кодом – python-библиотека VEDO [22]. В качестве виртуального ТО выбрана квадратная пластина с отверстиями, описание которой взято из работы [2].

Без ограничения общности далее геометрические размеры будут указываться без указания единиц измерения. Геометрические параметры ТО описываются в СК, начало которой совпадает с левым нижним углом квадратной пластины размера $48 \times 48 \times 8$, диаметры отверстий – 8. Схема нумерации отверстий изображена на рис. 2,а, координаты центров перечислены в табл. 1.

Для проведения численных экспериментов по эталонному описанию генерируется M_G векторная модель ТО в масштабе 1:10, т.е. размеры объекта вдоль осей координат $4.8 \times 4.8 \times 0.8$. Геометрический центр ТО совмещен с началом СК. Цилиндрические отверстия моделируются прямоугольными призмами с 24-угольником в основании. Размер стороны вокселя $\alpha = 0.02$. Визуализация 3d-модели ТО в начальном положении приведена на рис. 2,б.

Для моделирования неточности ориентации физического ТО при КТ-сканировании относительно СК реконструированного объема применя-

ется случайный поворот и сдвиг. Поворот задается вектором $\theta = \theta e$, где θ – угол поворота в радианах против часовой стрелки, $e \in \mathbb{R}^3$ – направляющий вектор оси поворота, $\|e\| = 1$. Сдвиг задается вектором $r \in \mathbb{R}^3$.

Для анализа результатов экспериментов углы поворота разделены по размеру модуля угла поворота на следующие группы (табл. 2). Для каждой группы сгенерировано $N_p = 100$ случайных реализаций смещения и поворота, которые используются во всех экспериментах.

Табл. 2

Группы поворотов по модулю поворота, R_g – индекс группы

R_g	Название	Диапазон, градусы
0	ноль	0
1	сверхмалые	(0, 1]
2	малые	(1, 5]
3	значимые	(5, 20]
4	большие	(20, 45]
5	сверхбольшие	(45, 180]

Вокселизация v векторной модели осуществляется при помощи функции *binarize* библиотеки VEDO таким образом, чтобы значения вокселей внутри ТО принимали значения 1, а снаружи – 0.

Для моделирования $\mathcal{R}$ размытия границ и яр-

Табл. 1

Координаты центров отверстий тестового объекта пластина с отверстиями, адаптировано из [23]

1	(6, 6)	2	(12, 6)	3	(18, 6)	4	(24, 6)	5	(33, 6)	6	(42, 6)	7	(6, 12)
8	(24, 12)	9	(39, 12)	10	(15, 15)	11	(6, 18)	12	(24, 18)	13	(36, 18)	14	(6, 24)
15	(12, 24)	16	(18, 24)	17	(24, 24)	18	(33, 24)	19	(42, 24)	20	(30, 30)	21	(6, 33)
22	(24, 33)	23	(18, 36)	24	(36, 36)	25	(12, 39)	26	(6, 42)	27	(24, 42)	28	(42, 42)

костного шума в каждом эксперименте проводится две серии генерации:

- без размытия и зашумления ($\sigma_{blur} = 0$, $\sigma_{noise} = 0$);
- с размытием Гауссовым фильтром ($\sigma_{blur} = 2$ в вокселях) и зашумлением значений аддитивным Гауссовым шумом ($\sigma_{noise} = 0.05$).

Пример распределения значений вокселей после применения $\mathcal{R}$ представлен на рис. 3. При этом параметры намеренно выбирались там, чтобы пороговое значение $t = 0.5$ хорошо отделяло воксели ТО от вокселей воздуха.

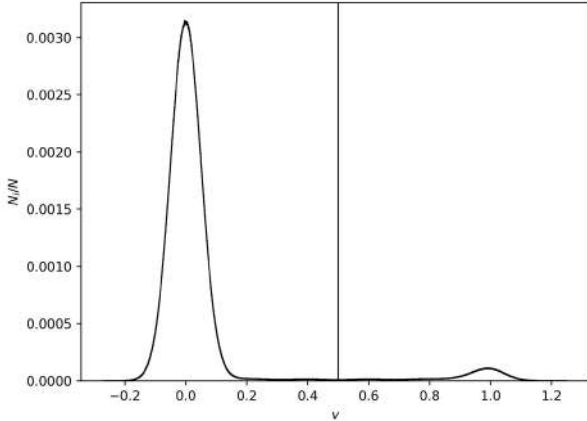


Рис. 3. Распределение значений вокселей v : N – количество вокселей, N_i – количество вокселей со значением v_i , порог для бинаризации $t = 0.5$, ($\sigma_{blur} = 2$ и $\sigma_{noise} = 0.05$)

В качестве функции векторизации воксельного объема $\mathcal{V}^{-1}$ используется построение изоповерхности для порогового значения $t = 0.5$ при помощи алгоритма Flying Edges [24], реализованного в функции *isosurface* библиотеки VEDO.

В первом эксперименте ($N_{tr} = 1$) для оценки влияния вокселизации исследуется расстояние между поверхностями $d_H(M_G, M_R)$. Результаты первого эксперимента для различных групп углов поворотов представлены на рис. 4,а.

Численные значения основных параметров распределений расстояний для всех экспериментов приведены в табл. 3.

Результаты показывают, что размытие и шум вносят значительный вклад в расстояние между поверхностями. Большие значения отклонений при нулевом и малых углах поворота могут быть объяснены ошибками дискретизации, которые принимают значения близкие к максимальным размерам вокселя. Для значительных и больших углов ошибка дискретизации распределяется более равномерно, поэтому именно эти диапазоны можно рекомендовать в качестве рабочих для измерений.

Во втором эксперименте ($N_{tr} = 2$) исследуется оценка расстояния между поверхностями

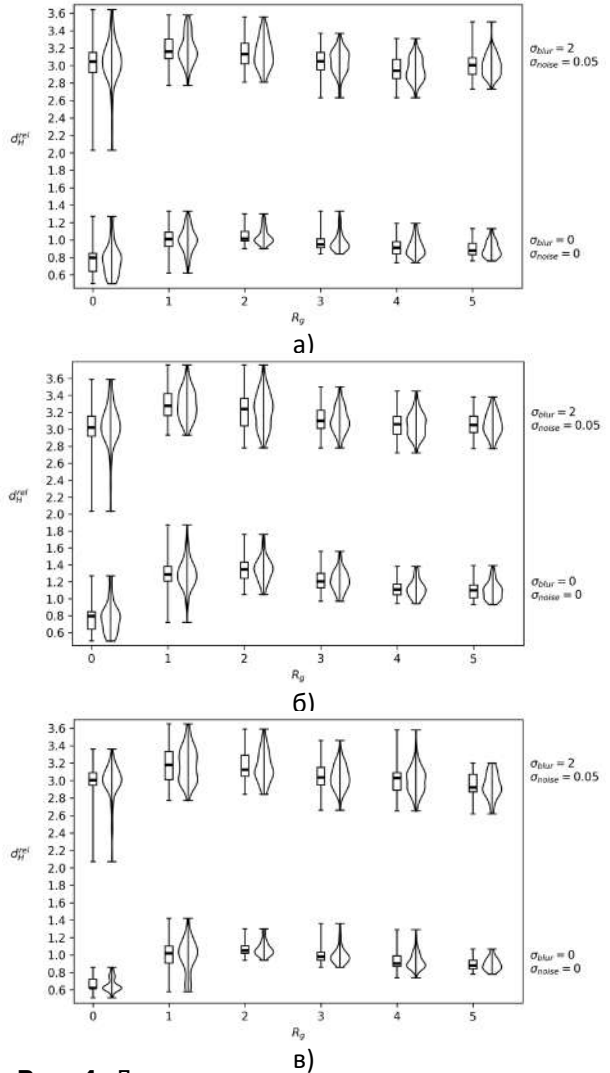


Рис. 4. Диаграммы размаха для углов поворота R_g в эксперименте: а) $N_{tr} = 1$, $d_H^{rel}(M_G, M_R)$; б) $N_{tr} = 2$, $d_H^{rel}(M_O, M_R^G)$; в) $N_{tr} = 3$, $d_H^{rel}(M_O, M_R^A)$

$d_H(M_O, M_R^G)$. Результаты эксперимента для различных групп углов поворотов представлены на рис. 4,б.

Характер и основные характеристики распределений аналогичны первому эксперименту.

В третьем эксперименте ($N_{tr} = 3$) для оценки автоматического совмещения моделей исследуется расстояние между поверхностями $d_H(M_O, M_R^A)$. В качестве функции автоматического выравнивания моделей $\mathcal{G}_{M_O}^A$ используется итеративный алгоритм ближайших точек (Iterative Closest Point, ICP) [25], реализованный в функции *align_to* библиотеки VEDO.

Оценка автоматического совмещения показала, что использование алгоритма ICP в некоторых случаях приводит к грубым ошибкам (рис. 5).

Табл. 3

Результаты экспериментов по оценке распределения расстояний d_H^{rel} : N_{tr} – номер эксперимента, R_g – номер группы углов поворота, Q_i – квартиль

N_{tr}	R_g	$\sigma_{noise} = 0, \sigma_{blur} = 0$					$\sigma_{noise} = 0.05, \sigma_{blur} = 2$				
		min	Q_1	Q_2	Q_3	max	min	Q_1	Q_2	Q_3	max
1	0	0.50	0.64	0.80	0.85	1.27	2.03	2.92	3.04	3.15	3.64
	1	0.62	0.93	1.01	1.09	1.33	2.77	3.08	3.16	3.30	3.58
	2	0.90	0.99	1.02	1.10	1.30	2.81	3.02	3.13	3.25	3.56
	3	0.84	0.91	0.95	1.01	1.33	2.63	2.95	3.05	3.15	3.37
	4	0.74	0.84	0.91	0.98	1.19	2.63	2.85	2.94	3.07	3.31
	5	0.76	0.83	0.88	0.96	1.13	2.73	2.90	3.00	3.09	3.50
2	0	0.50	0.64	0.80	0.85	1.27	2.03	2.92	3.02	3.15	3.59
	1	0.72	1.21	1.29	1.38	1.87	2.93	3.16	3.27	3.42	3.76
	2	1.05	1.24	1.35	1.43	1.76	2.78	3.04	3.24	3.36	3.76
	3	0.97	1.13	1.21	1.30	1.56	2.78	3.01	3.10	3.23	3.50
	4	0.94	1.05	1.11	1.17	1.38	2.72	2.94	3.06	3.15	3.45
	5	0.93	1.01	1.10	1.16	1.39	2.77	2.96	3.05	3.15	3.38
3	0	0.51	0.62	0.62	0.72	0.86	2.07	2.95	3.00	3.09	3.36
	1	0.58	0.91	1.02	1.10	1.42	2.77	3.01	3.18	3.33	3.65
	2	0.94	1.02	1.05	1.10	1.30	2.84	3.05	3.12	3.29	3.59
	3	0.86	0.94	0.98	1.03	1.36	2.66	2.95	3.04	3.15	3.46
	4	0.74	0.87	0.90	0.99	1.29	2.65	2.89	3.03	3.09	3.58
	5	0.78	0.84	0.88	0.94	1.07	2.62	2.87	2.92	3.07	3.20

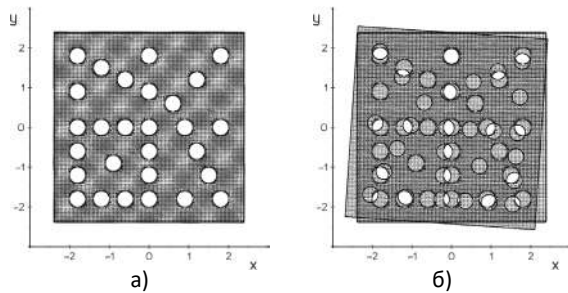


Рис. 5. Визуализация примера результатов автоматического геометрического совмещения:
а) корректно; б) грубая ошибка

Согласно результатам эксперимента (табл. 4), ошибки совмещения наблюдаются в диапазонах больших и сверхбольших углов, что может объясняться наличием у базовой формы ТО нескольких осей/плоскостей симметрии и «недостаточным» учетом конфигурации отверстий.

Для возможности качественного сравнения с первыми двумя экспериментами статистика для диаграммы размаха в третьем эксперименте собиралась только для совмещений без грубых ошибок, визуализация результатов представлена на рис. 4, в.

Табл. 4

Количество грубых ошибок автоматического совмещения

R_g	$\sigma_{noise} = 0, \sigma_{blur} = 0$	$\sigma_{noise} = 0.05, \sigma_{blur} = 2$
0-3	0	0
4	3	1
5	73	73

Характер и основные характеристики распределений похожи на предыдущие эксперименты. Отметим, что за исключением грубых ошибок метод автоматического совмещения успешно справляется и восстанавливает параметры близко к известным модельным (табл. 2). При малом угле поворота наблюдаются характерные «ступеньки» на плоских поверхностях ТО, появляющиеся в результате высокой неравномерности проявления ошибок дискретизации на этапе вокселизации (рис. 6).

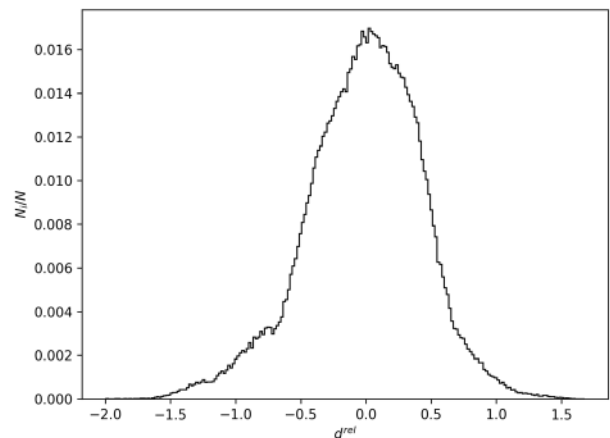


Рис. 6. Для сверхмалого угла поворота ($\theta = 1^\circ$, $\sigma_{blur} = 2$, $\sigma_{noise} = 0.05$) и относительного расстояния $d_H^{rel}(M_O, M_G^A)$ пример визуализации распределения расстояний

Заключение

В работе рассмотрены практические вопросы использования компьютерной томографии в задачах неразрушающего контроля для оценки геометрических параметров объектов. Для расширения доступных данных предложена модель виртуального конвейера генерации тестовых данных для анализа методов КТ в задачах НК. Программная часть конвейера реализована в виде python-скриптов с использованием библиотек с открытым кодом.

Для отладки конвейера проведены численные эксперименты с разными вариантами генерации воксельного объема (случайный поворот и сдвиг, размытие, зашумление) и последующим восстановлением векторной модели тестового объекта, а также оценкой метода автоматического совмещения эталонной и реконструированных векторных моделей. Для анализа результатов экспериментов углы поворота разделены на группы по размеру модуля угла. Измерения показали, что средние значения отклонения между векторными моделями (эталонной и реконструированной) при отсутствии размытия и шума составляют от 0.5 до 1.8 ребра вокселя, и при размытии $\sigma_{blur} = 2$, $\sigma_{noise} = 0.05$ этот показатель увеличивается (составляет от 2.0 до 3.7 ребра вокселя). Наименьшие отклонения достигаются при углах поворота ТО от 45 до 180° и от 20 до 45°. При этом при углах от 45 до 180° автоматическое совмещение часто (73 из 100) может приводить к грубым ошибкам совмещения.

В дальнейшем планируется расширение виртуального конвейера генерации тестовых данных для анализа методов КТ в задачах НК за счет использования инструментов моделирования процессов КТ-сканирования, а также более специфичных процедур оценки геометрических расстояний между контрольными элементами ТО.

Литература

1. Buzug T.M. Computed tomography // Springer handbook of medical technology. Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. P. 311-342. DOI: 10.1007/978-3-540-39408-2.
2. Withers P.J., Bouman C., Carmignato S., Cnudde V., Grimaldi D., Hagen C.K., Maire E., Manley M., Du Plessis A., Stock S.R. X-ray computed tomography // Nature Reviews Methods Primers. 2021. Vol. 1. No. 1. P. 18. DOI: 10.1038/s43586-021-00015-4.
3. Arlazarov V.L., Nikolaev D.P., Arlazarov V.V., Chukalina M.V. X-ray Tomography: the Way from Layer-by-layer Radiography to Computed Tomography // Computer Optics. 2021. Vol. 45. No. 6. P. 897-906. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-898.
4. Dewulf W., et al. Advances in the metrological traceability and performance of X-ray computed tomography // CIRP Annals. 2022. Vol. 71. No. 2. P. 693-716. DOI: 10.1016/j.cirp.2022.05.001.
5. Adler J., Öktem O. Learned Primal-Dual Reconstruction // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2018. Vol. 37. No. 6. P. 1322-1332. DOI: 10.1109/TMI.2018.2799231.
6. Ge R., He Y., Xia C., Sun H., Zhang Y., Hu D., Chen S., Chen Y., Li S., Zhang D. DDPNet: A Novel Dual-Domain Parallel Network for Low-Dose CT Reconstruction // Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention MICCAI 2022. Cham: Springer Nature Switzerland. 2022. P. 748-757. DOI: 10.1007/978-3-031-16446-0_71.
7. Niu C., Li M., Guo X., Wang G. Self-supervised dual-domain network for low-dose CT denoising // Developments in X-ray Tomography XIV. SPIE. 2022. Vol. 12242. P. 122420H. DOI: 10.1117/12.2633197.
8. Yamaev A.V., Chukalina M.V., Nikolaev D.P., Kochiev L.G., Chulichkov A.I. Neural network regularization in the problem of few-view computed tomography // Computer Optics. Institution of Russian Academy of Sciences, Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). 2022. Vol. 46. No. 3. P. 422-428. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1035.
9. Bulatov K.B., Ingacheva A.S., Gilmanov M.I., Kutukova K., Soldatova Z.V., Buzmakov A.V., Chukalina M.V., Zschech E., Arlazarov V.V. Towards monitored tomographic reconstruction: algorithm-dependence and convergence // Computer Optics. Institution of Russian Academy of Sciences, Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). 2023. Vol. 47. No. 4. P. 658-667. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1238.
10. Zhou Z., Song J., Xie X., Shu Z., Ma L., Liu D., Yin J., See S. Towards Building AI-CPS with NVIDIA Isaac Sim: An Industrial Benchmark and Case Study for Robotics Manipulation // 2024 IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society. 2024. P. 263-274. DOI: 10.1145/3639477.3639740.
11. Xu B., Gao F., Yu C., Zhang R., Wu Y., Wang Y. Omnidrones: An efficient and flexible platform for reinforcement learning in drone control // IEEE Robotics and Automation Letters. IEEE. 2024.
12. Chernyshova Y.S., Gayer A.V., Sheshkus A.V. Generation method of synthetic training data for mobile OCR system // ICMV 2017. Bellingham, Washington: Society of Photo-

- Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2018. Vol. 10696. P. 106962G1-106962G7. DOI: 10.1117/12.2310119.
13. *Gayer A.V., Chernyshova Y.S., Sheshkus A.V.* Effective real-time augmentation of training dataset for the neural networks learning // ICMV 2018. Bellingham, Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2019. Vol. 11041. P. 110411I1-110411I7. DOI: 10.1117/12.2522969.
 14. *Ketcham R.A., Hanna R.D.* Beam hardening correction for X-ray computed tomography of heterogeneous natural materials // Computers & Geosciences. 2014. Vol. 67. P. 49-61. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.03.003.
 15. *Lifton J.J., Liu T.* Evaluation of the standard measurement uncertainty due to the ISO50 surface determination method for dimensional computed tomography // Precision Engineering. 2020. Vol. 61. P. 82-92. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.10.004.
 16. *Büscher K.J., Degel J.P., Oellerich J.* A Comprehensive Survey of Isocontouring Methods: Applications, Limitations and Perspectives // Algorithms. MDPI. 2024. Vol. 17. No. 2. P. 83. DOI: 10.3390/a17020083.
 17. *Shen T., Munkberg J., Hasselgren J., Yin K., Wang Z., Chen W., Gojcic Z., Fidler S., Sharp N., Gao J.* Flexible Isosurface Extraction for Gradient-Based Mesh Optimization // ACM Transactions on Graphics. 2023. Vol. 42. No. 4. P. 37-1. DOI: 10.1145/3592430.
 18. *Xue L., Xu J., Ma K., Li Z., Wang J.* Adaptive and High-Precision Isosurface Meshes from CT Data // Journal of Nondestructive Evaluation. Springer. 2024. Vol. 43. No. 3. P. 85. DOI: 10.1007/s10921-024-01102-8.
 19. *Léonard F., Brown S.B., Withers P.J., Mummery P.M., McCarthy M.B.* A new method of performance verification for x-ray computed tomography measurements // Measurement Science and Technology. IOP Publishing. 2014. Vol. 25. No. 6. P. 065401. DOI: 10.1088/0957-0233/25/6/065401.
 20. *Wu M., FitzGerald P., Zhang J., Segars W.P., Yu H., Xu Y., De Man B.* XCIST—an open access x-ray/CT simulation toolkit // Physics in Medicine & Biology. IOP Publishing. 2022. Vol. 67. No. 19. P. 194002. DOI: 10.1088/1361-6560/ac9174.
 21. *Paramonov P., Francken N., Renders J., Iuso D., Elberfeld T., De Beenhouwer J., Sijbers J.* CAD-ASTRA: a versatile and efficient mesh projector for X-ray tomography with the ASTRA-toolbox // Optics Express. Optica Publishing Group. 2024. Vol. 32. No. 3. P. 3425-3439. DOI: 10.1364/OE.498194.
 22. *Musy M., Jacquenot G., Dalmaso G., Lee J., Soltwedel J., Pujol L., de Bruin R., Tulldahl M., Zhou Z.-Q., Enjalbert R., Claudi F., Hacha B., Badger C., Lu X., Sol A., Pollack A., Schneider O., Daizhirui, Scott OZ R., Mitrano P., Brodersen P., Schlömer N., kerrinrapid M., Wor J., Matzkin F., Evan, Hrisca D., Lerner B., Sullivan B., Yershov A.* marcomusy/vedo: 2024.5.2 // Zenodo. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.11846434.
 23. *Bartscher M., Illemann J., Neuschaefer-Rube U.* ISO test survey on material influence in dimensional computed tomography // Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. 2016. Vol. 6. P. 79-92. Special Issue: Industrial computed tomography. DOI: 10.1016/j.csndt.2016.04.001.
 24. *Schroeder W., Maynard R., Geveci B.* Flying edges: A high-performance scalable isocontouring algorithm // 2015 IEEE 5th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV). 2015. P. 33-40. DOI: 10.1109/LDAV.2015.7348069.
 25. *Li C., Xue J., Zheng N., Du S., Zhu J., Tian Z.* Fast and robust isotropic scaling iterative closest point algorithm // 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing. 2011. P. 1485-1488. DOI: 10.1109/ICIP.2011.6115724.

Чикин Павел Сергеевич. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия. Лаборант. Область научных интересов: обработка изображений, компьютерная томография, компьютерное моделирование. E-mail: pavel.sch91@gmail.com.

Солдатова Жанна Валерьевна. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия. Лаборант-программист. Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, г. Москва, Россия. Младший научный сотрудник. Область научных интересов: анализ и обработка изображений, вычислительная компьютерная томография. E-mail: zh.soldatova@smartengines.com

Ингачева Анастасия Сергеевна. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия. Научный сотрудник-программист. Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Кандидат технических наук. Область научных интересов: обработка и анализ изображений, вычислительная компьютерная томография. E-mail: a.ingacheva@smartengines.com

Полевой Дмитрий Валерьевич. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия. Научный сотрудник-программист. Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Кандидат технических наук. Область научных интересов: компьютерная томография, обработка и анализ изображений, распознавание образов, машинное обучение. E-mail: dvpsun@gmail.com (ответственный за переписку)

Virtual data generation pipeline for the analysis of computed tomography methods

P.S. Chikin^I, Zh.V. Soldatova^{I,II}, A.S. Ingacheva^{I,II}, D.V. Polevoy^{I,II,III}

^I Smart Engines Service LLC, Moscow, Russia

^{II} Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute), Moscow, Russia

^{III} Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This article addresses the practical application of computed tomography in non-destructive testing for assessing the geometric parameters of objects in industrial and laboratory research. A review of the literature reveals that most published works rely on closed data, which significantly complicates scientific research regarding the reproduction of results and comparison of various tomographic reconstruction methods and analysis of reconstructed data. To address this issue, the authors propose employing numerical modeling with open-source software. An original scheme for a virtual pipeline for generating test data is introduced, with the initial stage implemented as a set of Python scripts, supported by numerical experiments.

Keywords: *non destructive testing, x-ray computed tomography, computed simulation*

DOI: 10.14357/20790279240406 **EDN:** CZKOHZ

References

1. Buzug T.M. Computed tomography. Springer handbook of medical technology. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008; p. 311–342. doi:10.1007/978-3-540-39408-2.
2. Withers P.J., Bouman C., Carmignato S., Cnudde V., Grimaldi D., Hagen C.K., et al. X-ray computed tomography. Nature Reviews Methods Primers. 2021;1(1): p. 18. doi:10.1038/s43586-021-00015-4.
3. Arlazarov V.L., Nikolaev D.P., Arlazarov V.V., Chukalina M.V. X-ray tomography: the way from layer-by-layer radiography to computed tomography. Computer Optics. 2021;45(6): p. 897–906. doi:10.18287/2412-6179-CO-898.
4. Dewulf W., et al. Advances in the metrological traceability and performance of X-ray computed tomography. CIRP Annals. 2022;71(2): p. 693–716. doi:10.1016/j.cirp.2022.05.001.
5. Adler J., Öktem O. Learned primal-dual reconstruction. IEEE Trans Med Imaging. 2018;37(6): p. 1322–1332. doi:10.1109/TMI.2018.2799231.
6. Ge R., He Y., Xia C., Sun H., Zhang Y., Hu D., et al. DDPNet: A novel dual-domain parallel network for low-dose CT reconstruction. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2022. Cham: Springer Nature Switzerland. 2022; p. 748–757. doi:10.1007/978-3-031-16446-0_71.
7. Niu C., Li M., Guo X., Wang G. Self-supervised dual-domain network for low-dose CT denoising. Developments in X-ray Tomography XIV. SPIE. 2022; p. 122420H. doi:10.1117/12.2633197.
8. Yamaev A.V., Chukalina M.V., Nikolaev D.P., Kochiev L.G., Chulichkov A.I. Neural network regularization in the problem of few-view computed tomography. Computer Optics. 2022;46(3): p. 422–428. doi:10.18287/2412-6179-CO-1035.
9. Bulatov K.B., Ingacheva A.S., Gilmanov M.I., Kutukova K., Soldatova Z.V., Buzmakov A.V., et al. Towards monitored tomographic reconstruction: algorithm-dependence and convergence. Computer Optics. 2023;47(4):658–667. doi:10.18287/2412-6179-CO-1238.
10. Zhou Z., Song J., Xie X., Shu Z., Ma L., Liu D., et al. Towards building AI-CPS with NVIDIA Isaac Sim: An industrial benchmark and case study for robotics manipulation. 2024 IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society. 2024; p. 263–274. doi:10.1145/3639477.3639740.

11. Xu B., Gao F., Yu C., Zhang R., Wu Y., Wang Y. Omnidrones: An efficient and flexible platform for reinforcement learning in drone control. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2024.
12. Chernyshova Y.S., Gayer A.V., Sheshkus A.V. Generation method of synthetic training data for mobile OCR system. Verikas A., Radeva P., Nikolaev D., Zhou J., editors. *ICMV 2017*. Bellingham, Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2018; p. 106962G1–106962G7. doi:10.1117/12.2310119.
13. Gayer A.V., Chernyshova Y.S., Sheshkus A.V. Effective real-time augmentation of training dataset for the neural networks learning. *ICMV 2018*. Bellingham, Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2019; p. 110411I1–110411I7. doi:10.1117/12.2522969.
14. Ketcham R.A., Hanna R.D. Beam hardening correction for X-ray computed tomography of heterogeneous natural materials. *Computers & Geosciences*. 2014;67: p. 49–61. doi:10.1016/j.cageo.2014.03.003.
15. Lifton J.J., Liu T. Evaluation of the standard measurement uncertainty due to the ISO50 surface determination method for dimensional computed tomography. *Precision Engineering*. 2020;61: p. 82–92. doi:10.1016/j.precisioneng.2019.10.004.
16. Büscher K.J., Degel J.P., Oellerich J. A comprehensive survey of isocontouring methods: applications, limitations and perspectives. *Algorithms*. 2024;17(2): p. 83. doi:10.3390/a17020083.
17. Shen T., Munkberg J., Hasselgren J., Yin K., Wang Z., Chen W., et al. Flexible isosurface extraction for gradient-based mesh optimization. *ACM Transactions on Graphics*. 2023;42(4): p. 37. doi:10.1145/3592430.
18. Xue L., Xu J., Ma K., Li Z., Wang J. Adaptive and high-precision isosurface meshes from CT data. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2024;43(3):85. doi:10.1007/s10921-024-01102-8.
19. Léonard F., Brown S.B., Withers P.J., Mummery P.M., McCarthy M.B. A new method of performance verification for X-ray computed tomography measurements. *Measurement Science and Technology*. 2014;25(6): p. 065401. doi:10.1088/0957-0233/25/6/065401.
20. Wu M., FitzGerald P., Zhang J., Segars W.P., Yu H., Xu Y., et al. XCIST—an open access X-ray/CT simulation toolkit. *Physics in Medicine & Biology*. 2022;67(19): p. 194002. doi:10.1088/1361-6560/ac9174.
21. Paramonov P., Francken N., Renders J., Iuso D., Elberfeld T., De Beenhouwer J., Sijbers J. CAD-ASTRA: a versatile and efficient mesh projector for X-ray tomography with the ASTRA-toolbox. *Optics Express*. 2024;32(3):3425–39. doi:10.1364/OE.498194.
22. Musy M., Jacquenot G., Dalmasso G., Lee J., Soltwedel J., Pujol L., et al. marcomusy/vedo: 2024.5.2. Zenodo. 2024; doi:10.5281/zenodo.11846434.
23. Bartscher M., Illema J., Neuschaefer-Rube U. ISO test survey on material influence in dimensional computed tomography. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016;6: p. 79–92. doi:10.1016/j.csndt.2016.04.001.
24. Schroeder W., Maynard R., Geveci B. Flying edges: a high-performance scalable isocontouring algorithm. *Proceedings of the 2015 IEEE 5th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV)*. 2015; p. 33–40. doi:10.1109/LDAV.2015.7348069.
25. Li C., Xue J., Zheng N., Du S., Zhu J., Tian Z. Fast and robust isotropic scaling iterative closest point algorithm. *Proceedings of the 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing*. 2011; p. 1485–8. doi:10.1109/ICIP.2011.6115724.

Chikin P.S. Smart Engines Service LLC, Moscow. Laboratory assistant, programmer. Research interests: image processing, computed tomography, computed simulation. E-mail: pavel.sch91@gmail.com

Soldatova Zh.V. Smart Engines Service LLC, Moscow. Laboratory assistant, programmer. Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow. Junior Researcher, part-time worker. Research Interests: Image analysis and processing, X-ray computed tomography. E-mail: zh.soldatova@smartengines.com

Ingacheva A.S. Smart Engines Service LLC, Moscow. Researcher-programmer. Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow. Researcher, Smart Engines Service LLC, Moscow. Researcher-programmer. PhD. Research Interests: Image analysis and processing, X-ray computed tomography. E-mail: a.ingacheva@smartengines.com

Polevoy D.V. Researcher-programmer. at the Smart Engines Service LLC, Moscow. Senior Researcher at the Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Senior Researcher at the Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. PhD. Research interests: computed tomography, image processing and analysis, pattern recognition, machine learning. E-mail: dvpsun@gmail.com