

процессов приводит к тому, что в области образца, близкой к началу движения источника, и состав, и поле остаточных напряжений и деформаций оказываются существенно не однородными. При $x \rightarrow 0$, очевидно, напряжения нулевые. Подобные эффекты обнаруживаются и в экспериментальных исследованиях.

Результаты зависят от выбранной системы, условий синтеза и геометрических параметров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 13-03-01179_a).

Литература

1. Sorokova S.N., Knyazeva A.G. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2008. – Т. 42. – № 4. – С. 443-451.
2. Князева А.Г., Крюкова О.Н., Букрина Н.В., Сорокова С.Н.// Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 2. – С. 93-101.
3. Боли Б., Уайнер Дж. Теория температурных напряжений: пер. с англ. – М.: Мир. 1964. 518 С.
4. Сорокова С.Н., Князева А.Г. Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44. № 2. С. 184-197.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

Шкарин А.В., Шкарин Р.В., Цапко С.Г.
Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: cupmathii@gmail.com

Введение

Современные научные исследования часто требуют применение томографии для изучения внутренней структуры объекта, так как она позволяет изучить внутреннюю структуру объекта без физического вмешательства. Однако, применение томографии подразумевает облучение образца, что может привести к его смерти или разрушению.

Особенно остро проблема смерти исследуемого объекта стоит в области биологии развития. В работе [1] продемонстрировано поведение клеток в живом эмбрионе гладкой шпорцевой лягушки (*Xenopus laevis*) на стадии гастрюлы. Авторы показали миграцию клеток только на стадии гастрюлы потому, что эмбрион быстро погибал под действием излучения.

Для снижения дозы облучения существует три подхода:

- снижение энергии пучка;
- снижение времени облучения;
- снижение числа проекций.

Первые два – ведут к недостаточному количеству зафиксированных фотонов, что, в свою очередь, приводит к увеличению шума на полученных данных. Последний подход ведет к недостатку измерений, что нарушает теорему Найквиста-Шеннона.

Ввиду того, что измерения сами по себе ничего не говорят о внутренней структуре сложного объекта, необходимо произвести воссоздание его трехмерной модели. Для выполнения данной задачи, в томографии существуют специальные методы, которые можно разделить на аналитические и итерационные. Итерационные методы, в свою очередь, подразделяются на статистические и алгебраические методы. Аналитические методы отличаются высокой скоростью реконструкции и высокими требованиями к качеству и полноте по-

лученных данных. Итерационные методы, напротив, имеют значительно меньшую скорость реконструкции и менее требовательны к качеству и полноте данных, ввиду возможности моделирования эксперимента и встраивания дополнительной информации в модель.

Очевидно, что в задачах, где требуется снизить дозу облучения образца, следует использовать итерационные методы реконструкции. Принимая во внимание тот факт, что количество данных, получаемых с одного эксперимента высоко (реконструкция может достигать 3 гигапикселей [2]), скорость реконструкции также играет важную роль. Таким образом, реализуемые методы должны максимально использовать доступные вычислительные ресурсы, такие как центральные процессоры (CPU) и графические процессоры (GPU).

Выявление требований к программному обеспечению

Все итерационные методы используют моделирование процесса проецирования для выбранной геометрии пучка, для этого существуют различные подходы, которые отличаются по точности, скорости и возможности распараллеливания вычислений. Кроме того, снижение дозы облучения одним из указанных выше способов ведет к недоопределенной задаче реконструкции, имеющей множество решений-кандидатов. Для выбора наилучшего решения в модель вводят дополнительную информацию (т.е. производят ее регуляризацию).

В качестве основной регуляризации, как правило, применяют подход, основанный на теории сжатых измерений [3] с использованием различных базисов (вейвлеты, полная вариация и пр.). Помимо этого, возможно применять дополнительные ограничения. К примеру, все пиксели рекон-

струируемого изображения должны быть положительными (т.к. плотность не может быть отрицательной). Или же, если доподлинно известно, что объект содержит большие однородные области, можно ввести требование минимизации полной вариации реконструируемого изображения.

Основываясь на вышесказанном и исходя из финансовых соображений, авторами статьи были выведены следующие требования к программному обеспечению, реализующему итерационные методы реконструкции:

- гибкость в формировании метода;
- расширяемость;
- использование GPU для ускорения вычислений;
- использование открытых стандартов.

Обзор существующих программных продуктов

Авторами стать был произведен поиск существующих программных продуктов, реализующих итерационные методы реконструкции. Среди найденных вариантов были проанализированы те, которые имеют открытый исходный код и сразу могут быть использованы.

1. AIR Tools разработан для Matlab, он реализует базовые алгебраические методы, но не поддерживает вычисления на GPU, не позволяет использовать различные методы проецирования в выбранном алгебраическом методе и не предоставляет какой-либо регуляризации.

2. ASTRA Toolbox разработан в университете Антверпена, он реализует базовые итерационные методы, поддерживает 2D и 3D геометрию. Он так же использует вычисления на GPU, но не предоставляет гибкости в выборе метода проецирования и не предоставляет какой-либо регуляризации (для GPU версии). Кроме того, вычисления на GPU организованы с помощью проприетарной библиотеки CUDA, которая поддерживается только графическими процессорами от компании NVIDIA.

3. OpenRecon реализован для Matlab, он предоставляет базовые итерационные методы реконструкции и регуляризацию с помощью полной вариации. Однако, данный продукт не использует GPU для выполнения вычислений.

4. RyHST2 разработан Алессандро Мироне, он не реализует стандартных методов алгебраической реконструкции, вместо них используется итерационный метод обратного проецирования с фильтрацией. RyHST2 не предоставляет выбора метода проецирования, но допускает регуляризацию, основанную на полной вариации и регуляризацию, основанную на поверхностях с ограниченными перекрытиями. Все операции выполняются на GPU и CPU, однако, для реализации операций на GPU применялась библиотека CUDA, поэтому они работают только на графических процессорах компании NVIDIA.

Библиотека UfoART

По результатам анализа существующего программного обеспечения, авторами было принято решение о разработке и реализации собственной библиотеки, отвечающей заявленным требованиям. В качестве базы был выбран фреймворк UFO [4], предоставляющий удобные механизмы работы с памятью и динамической загрузки программных модулей.

Авторами была разработана и реализована библиотека UfoART, а так же вычислительная задача, позволяющая без труда скомпоновать и интегрировать итерационный метод реконструкции в процесс обработки данных. В библиотеке UfoART на текущий момент реализованы алгоритмы SART и SIRT, а также динамические модули метода проецирования Joseph и регуляризатора Total Variation.

С помощью библиотеки UfoART авторами была произведена реконструкция искусственного набора данных – фантома Шеппа Логана (рис. 1), с регуляризацией и без нее.



Рис. 1. Фантом Шеппа-Логана

Полученные результаты были сопоставлены с эталоном и реконструкцией, полученной методом обратного проецирования с фильтрацией (FBP) (рис. 2).

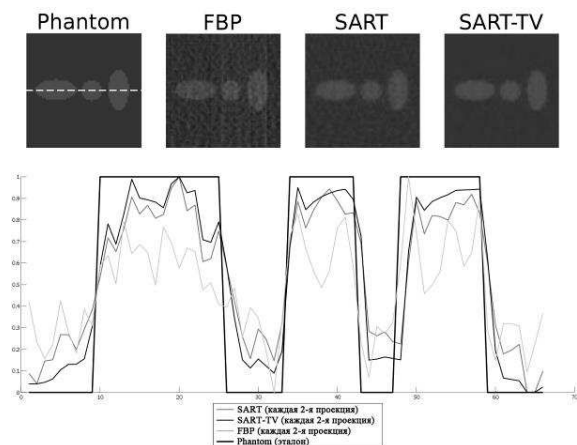


Рис. 2. Реконструкция фантома Шеппа-Логана различными методами. Построение профиля через три нижних овала

Заключение

В результате проведенного исследования было выявлено отсутствие полностью открытого программного продукта, который предоставлял бы набор решателей, методов регуляризации и проецирования с возможностью их комбинирования в полноценный итерационный метод, использующий возможности CPU и GPU для ускорения вычислений. Поэтому, авторами была разработана и реализована открытая библиотека UfoART, обеспечивающая необходимый уровень модульности итерационного алгоритма и использующая открытый стандарт OpenCL для реализации вычислений на GPU. С помощью данной библиотеки была произведена реконструкция синтетического набора данных, показавшая улучшение качества реконструкции при использовании алгебраического метода с регуляризацией по сравнению с FBP.

Литература

1. Moosmann J. et al. X-ray phase-contrast in vivo microtomography probes new aspects of *Xenopus* gastrulation // *Nature*. – 2013. – Т. 497. – №. 7449. – С. 374-377.
2. Chilingaryan S. et al. A GPU-based architecture for real-time data assessment at synchrotron experiments // *Nuclear Science, IEEE Transactions on*. – 2011. – Т. 58. – №. 4. – С. 1447-1455.
3. Donoho D. L. Compressed sensing // *Information Theory, IEEE Transactions on*. – 2006. – Т. 52. – №. 4. – С. 1289-1306.
4. Vogelgesang M. et al. UFO: A Scalable GPU-based Image Processing Framework for On-line Monitoring // *High Performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems (HPCC-ICCESS), 2012 IEEE 14th International Conference on*. – IEEE, 2012. – С. 824-829.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Шкарин Р.В., Шкарин А.В., Цапко С.Г.
Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: mathii2009@gmail.com

Введение

В настоящее время, Технологическим институтом Карлсруэ совместно с Томским политехническим университетом и рядом других российских вузов, ведется разработка международного проекта UFO (The Ultra-fast X-ray imaging of scientific processes with on-line assessment and data-driven process control) [1].

Целью данного проекта является создание двух экспериментальных станций: первая должна быть создана и внедрена на станции IMAGE на синхротроне ANKA, который принадлежит Технологическому институту Карлсруэ; вторая станция должна быть построена на синхротроне Сибирь-2, который построен на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Станции будут оптимизированы для проведения трехмерной и четырехмерной томографии технологических и биологических процессов с возможностью мониторинга получаемых данных в реальном времени и контроля, как самого образца, так и процесса получения данных.

Этот проект является уникальным потому, что он сочетает в себе интеллектуальную и интерактивную систему формирования и обработки изображений, которая позволяет комбинировать процесс управления образцом и параметрами луча. Кроме этого, работы над проектом подразумевают создание новых средств для усовершенствования стратегии обработки данных. При этом вместо хранения данных во внутренней памяти камеры с последующим перемещением их на внешнее хранилище, проведения анализа и обработки данных,

реконструкция изображений будет осуществляться в режиме реального времени с использованием современных технологий на основе графических процессоров (GPU) и программируемых пользователем вентильных матрицы (FPGA). Полученных результатов планируется использовать как для контроля изучаемого технологического процесса, так и для калибровки параметров луча и положения изучаемого образца.

Авторами статьи предложена реализация аналитического метода реконструкции томографических изображений с использованием вычислений на GPU, что позволяет реализовать процесс реконструкции в реальном времени. При этом, полученная реализация алгоритма работает быстрее уже существующего и широко используемого метода фильтрованного обратного проецирования (ФОП).

Алгоритм прямой инверсии Фурье

Данный метод [2, 3], как и все аналитические методы основаны на теореме о центральном сечении. Эта теорема утверждает, что, результат одномерного преобразования Фурье от проекции объекта, взятой под определенным углом, эквивалентен данным, расположенным вдоль линии, проходящей через центр двумерного Фурье домена под тем же самым углом. В соответствии с описанной теоремой, используя данные синопграммы, возможно получить реконструкцию поперечного сечения исследуемого объекта, путем восстановления приближения его двумерного Фурье домена. Авторами статьи предложена следующая интерпретация алгоритма: