



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Робототехники и комплексной автоматизации»
КАФЕДРА «Системы автоматизированного проектирования (РК-6)»

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЗАМЕТКИ
по направлению «Разработка систем инженерного анализа и
ресурсоемкого ПО (rndhpc)»

Авторы (исследователи):	Крехтунова Д., Ершов В., Муха В., Тришин И.
Научный(е) руководитель(и):	Соколов А.П., Першин А.Ю.
Консультанты:	@Фамилия И.О.@

Москва, 2021–2021

Работа (документирование) над научным направлением начата 20 сентября 2021 г.

Руководители по направлению:

СОКОЛОВ,	–	канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры САПР,
Александр Павлович		МГТУ им. Н.Э. Баумана
ПЕРШИН,	–	PhD, ассистент кафедры САПР,
Антон Юрьевич		МГТУ им. Н.Э. Баумана

Исследователи (студенты кафедры САПР, МГТУ им. Н.Э. Баумана):

Крехтунова Д., Ершов В., Муха В., Тришин И.

C59 **Крехтунова Д., Ершов В., Муха В., Тришин И.. Разработка систем инженерного анализа и ресурсоемкого ПО (rndhpc):** Научно-исследовательские заметки. / Под редакцией Соколова А.П. [Электронный ресурс] — Москва: 2021. — 17 с. URL: <https://arch.rk6.bmstu.ru> (облачный сервис кафедры РК6)

Документ содержит краткие материалы, формируемые обучающимися и исследователями в процессе их работ по одному научному направлению.

Документ разработан для оценки результативности проведения научных исследований по направлению «Разработка систем инженерного анализа и ресурсоемкого ПО» в рамках реализации курсовых работ, курсовых проектов, выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров, а также диссертационных исследований аспирантов кафедры «Системы автоматизированного проектирования» (РК6) МГТУ им. Н.Э. Баумана.

RNDHPC



Крехтунова Д., Ершов В., Муха В., Тришин И.,
Соколов А.П., Першин А.Ю., 2021

Содержание

1	Разработка графоориентированного дебаггера	4
2021.11.10:	Автоматизированные и автоматические методы отладки, применяемые при реализации сложных вычислительных методов (СВМ), отладка наукоёмкого кода, science code debugging, graph based programming и пр. (первичный обзор литературы)	4
	Анализ взвешенных графов вызовов для локализации ошибок программного обеспечения	4
	Интегрированная отладка моделей Modelica	5
	Систематические методы отладки для масштабных вычислительных фреймворков высокопроизводительных вычислений	7
	Ориентированный на данные фреймворк для отладки параллельных приложений	8
	Определение степени и источников недетерминизма в приложениях MPI с помощью ядер графов	10
2021.11.22:	Web-инструменты для древовидного представления ассоциативных массивов, визуализация ассоциативных массивов (первичный обзор литературы)	12
	Ассоциативные массивы	12
	Набор библиотек TnT для web-визуализации деревьев и аннотаций на основе трассировок	13
	Программное обеспечение Empress интерактивного и исследовательского анализа многомерных наборов данных на основе деревьев	14
	Программный инструмент Treemap визуализации иерархических структур	14
	Web-инструмент DoubleRecViz для визуализации согласования деревьев транскриптов и генов	15
2	Разработка web-ориентированного редактора графовых моделей	15
2021.10.05:	Обзор языка описания графов DOT	15
3	Реализация поддержки различных стратегий распараллеливания в рамках графоориентированного программного каркаса	16
4	Реализация графоориентированной технологии определения бизнес-логики работы пользователя в системе	16

1 Разработка графоориентированного дебаггера

2021.11.10: Автоматизированные и автоматические методы отладки, применяемые при реализации сложных вычислительных методов (СВМ), отладка наукоёмкого кода, science code debugging, graph based programming и пр. (первичный обзор литературы)

Анализ взвешенных графов вызовов для локализации ошибок программного обеспечения

Далее представлен материал, являющийся результатом анализа работы [2].

Проблема Обнаружение сбоев, которые приводят к ошибочным результатам с некоторыми, но не со всеми входными данными.

Предложенное решение Метод анализа графов вызовов функций с последующим составлением рейтинга методов, которые вероятнее всего содержат ошибку.



Описание решения *Граф вызовов*

Метод основан на анализе графа вызовов. Такой граф отражает структуру вызовов при выполнении конкретной программы. Без какой-либо дополнительной обработки граф вызовов представляет собой упорядоченное дерево с корнем.

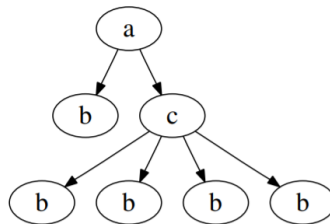


Рис. 1. Граф вызовов

Узлами являются сами методы, а гранями – их вызовы. Метод `main()` программы обычно является ее корнем, а все методы, вызываемые напрямую, являются ее дочерними элементами.

Редукция графа

Трассировка представляется в виде графов вызовов, затем повторяющиеся вызовы методов, вызванные итерациями, удаляются, вместо этого вводятся веса ребер, представляющие частоту вызовов.

Поиск подграфов

Для поиска подграфов используется фреймворк для ранжирования потенциально ошибочных методов.

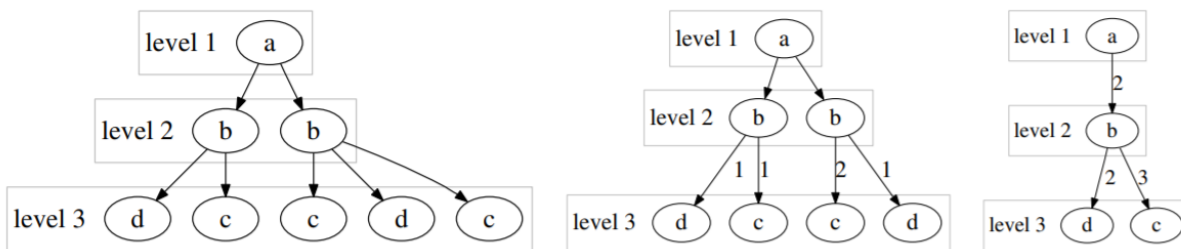


Рис. 2. Редукция графа вызовов

После сокращения графов вызовов, полученных от правильного и неудачного выполнения программ, применяется поиск часто встречающихся замкнутых подграфов SG в наборе данных графа G, используя алгоритм CloseGraph. Полученный набор подграфов разделяется на те, которые встречаются при правильном и неудачном выполнении (SGcf), и те, которые возникают только при неудачном выполнении (SGf).

Анализ

Два набора подграфов рассматриваются отдельно.

SGcf используется для построения рейтинга на основе различий в весах ребер при правильном и неудачном выполнении. Графы анализируются: применяется алгоритм выбора характеристик на основе энтропии к весам различных ребер для вычисления вероятности вызова метода и вероятности содержания в нем ошибки.

Алгоритм на основе энтропии не может обнаружить ошибки, которые не влияют на частоту вызовов и не учитывает подграфы, которые появляются только в ошибочной версии (SGf).

Поэтому отдельно рассчитывается оценка для методов, содержащихся только в ошибочной версии. Эта оценка - еще одна вероятность наличия ошибки, основанная на частоте вызовов методов при неудачных выполнениях.

Затем вычисляется общая вероятность наличия ошибки для каждого метода. Этот рейтинг дается разработчику программного обеспечения, который выполняет анализ кода подозрительных методов.

Интегрированная отладка моделей Modelica

Далее представлен материал, являющийся результатом анализа работы [3].

Modelica – объектно-ориентированный, декларативный язык моделирования сложных систем (в частности, систем, содержащих механические, электрические, электронные, гидравлические, тепловые, энергетические компоненты).

Проблема Из за высокого уровня абстракции и оптимизации компиляторов, обеспечивающих простоту использования, ошибки программирования и моделирования часто трудно обнаружить.

Предложенное решение В статье представлена интегрированная среда отладки, сочетающая классическую отладку и специальные техники (для языков основанных на уравнениях) частично основанные на визуализации графов зависимостей.

Описание решения На этапе моделирования пользователь обнаруживает ошибку в нанесенных на график результатах, или код моделирования во время выполнения вызывает ошибку.

Отладчик строит интерактивный граф зависимостей (IDG) по отношению к переменной или выражению с неправильным значением.

Узлы в графе состоят из всех уравнений, функций, определений значений параметров и входных данных, которые использовались для вычисления неправильного значения переменной, начиная с известных значений состояний, параметров и времени.

Переменная с ошибочным значением (или которая вообще не может быть вычислена) отображается в корне графа.

Ребра могут быть следующих двух типов.

- Ребра зависимости данных: направленные ребра, помеченные переменными или параметрами, которые являются входными данными (используются для вычислений в этом уравнении) или выходными данными (вычисляются из этого уравнения) уравнения, отображаемого в узле.
- Исходные ребра: неориентированные ребра, которые связывают узел уравнения с реальной моделью, к которой принадлежит это уравнение. ребра, указывающие из сгенерированного исполняемого кода моделирования на исходные уравнения или части уравнений, участвующие в этом коде



Пользователь может:

- Отобразить результаты симуляции, выбрав имя переменной или параметра(названия ребер). График переменной покажется в дополнительном окне. Пользователь может быстро увидеть, имеет ли переменная ошибочное значение.
- Отобразить код модели следуя по исходным ребрам.
- Вызвать подсистему отладки алгоритмического кода, если пользователь подозревает, что результат переменной, вычисленной в уравнении, содержащем вызов функции, неверен, но уравнение кажется правильным.

Используя эти средства интерактивного графа зависимостей, пользователь может проследить за ошибкой от ее проявления до ее источника.

Систематические методы отладки для масштабных вычислительных фреймворков высокопроизводительных вычислений

Далее представлен материал, являющийся результатом анализа работы [4].

Параллельные вычислительные фреймворки для высокопроизводительных вычислений играют центральную роль в развитии исследований, основанных на моделировании, в науке и технике.

Фреймворк Uintah был создан для решения сложных задач взаимодействия жидких структур с использованием параллельных вычислительных систем.

Проблема Поиск и исправление ошибок в параллельных фреймворках, возникающих из-за параллельного характера кода.

Предложенное решение В статье описывается подход к отладке крупномасштабных параллельных систем, основанный на различиях в исполнении между рабочими и нерабочими версиями. Подход основывается на трассировке стека вызовов.

Исследование проводилось для вычислительной платформы Uintah Computational Framework.

Описание решения Так как количество трассировок стека, которые можно получить при выполнении программы, может быть большим, для лучшего понимания используются графы, которые могут сжать несколько миллионов трассировок стека в одну управляемую фигуру. Метод основан на получении объединенных графов трассировки стека (CSTG).

Хотя сбор и анализ трассировки стека ранее изучались в контексте инструментов и подходов, их внимание не было сосредоточено на кросс-версии (дельта) отладке.

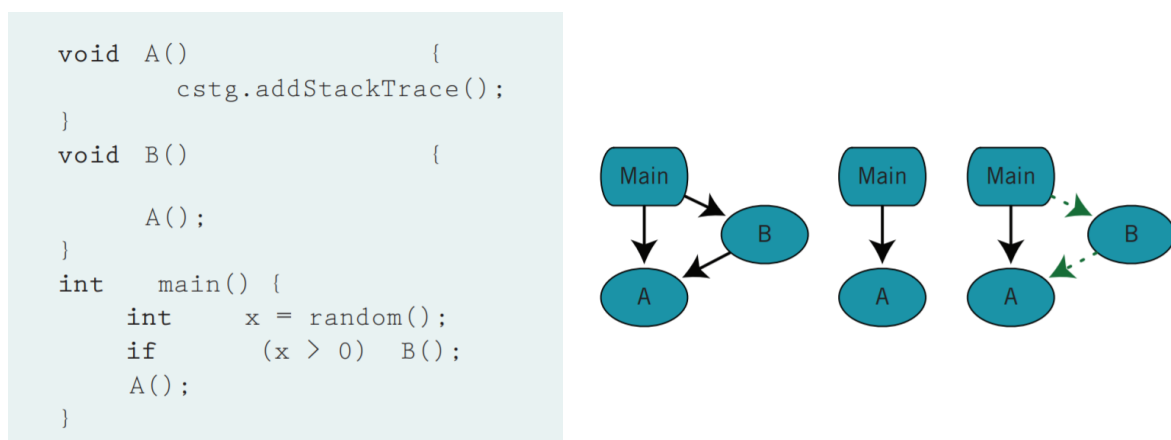


Рис. 3. Пример построения CSTG

CSTG не записывают каждую активацию функции, а только те, что в трассировках стека ведут к интересующей функции (функциям), выбранной пользователем. Каждый узел CSTG представляет все активации конкретного вызова функции. Помимо

имен функций, узлы CSTG также помечаются уникальными идентификаторами вызова. Грани представляют собой вызовы между функциями.

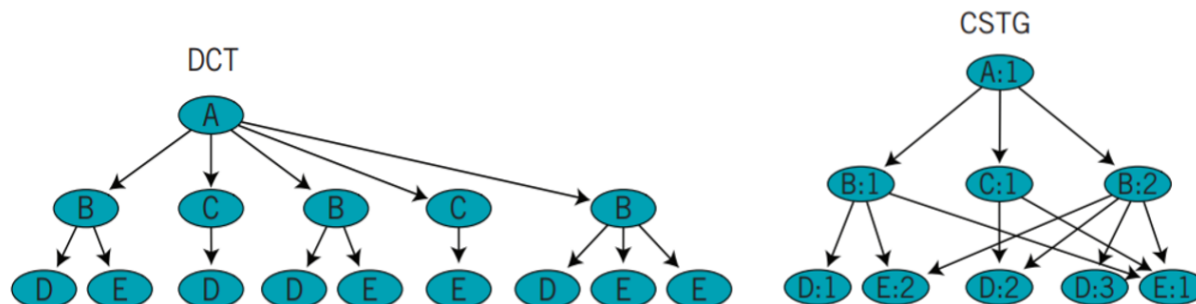


Рис. 4. CSTG

Пользователю необходимо вставить в интересующие функции вызовы `cstg.addStackTrace()`. Инструмент CSTG автоматически запускает тестируемый пример с использованием различных сценариев, создает графы и помогает пользователям увидеть существенные различия между сценариями. Сама ошибка обычно обнаруживается и подтверждается с помощью традиционного отладчика, при этом дельта-группы CSTG наводят на место возникновения ошибки.

Ориентированный на данные фреймворк для отладки параллельных приложений

Далее представлен материал, являющийся результатом анализа работы [5].

Проблема Обнаружение ошибок в крупномасштабных научных приложениях, работающих на сотнях тысяч вычислительных ядер.

Неэффективность параллельных отладчиков для отладки пета-масштабных приложений.

Предложенное решение В этом исследовании представлена реализация фреймворка для отладки, ориентированного на данные, в котором в качестве основы используются утверждения. Подход, ориентированный на данные можно использовать для повышения производительности параллельных отладчиков.

Метод, представленный в статье основан на параллельном отладчике Guard, который поддерживает тип утверждения во время отладки, называемые сравнительные утверждения.

Описание решения Утверждение – это утверждение о предполагаемом поведении компонента системы, которое должно быть проверено во время выполнения. В программировании программист определяет утверждение, чтобы гарантировать определенное состояние программы во время выполнения.

Пользователь делает заявления о содержимом структур данных, затем отладчик проверяет достоверность этих утверждений.

В следующем списке показаны примеры утверждений, которые можно использовать для обнаружения ошибок во время выполнения:

- «Содержимое этого массива всегда должно быть положительным».
- «Сумма содержимого этого массива всегда должна быть меньше постоянной границы».
- «Значение в этом скаляре всегда должно быть больше, чем значение в другом скаляре».
- «Содержимое этого массива всегда должно быть таким же, как содержимое другого массива».

В работе используются два новых шаблона утверждений помимо сравнительных: общие специальные утверждения и статистические утверждения.

Общие специальные утверждения позволяют использовать простые арифметические и булевы операции.

```
for (j = 0; j < n; j++) {  
  for (i = 0; i < m; i++) {  
    pold[j][i] = 50000.;  
    pressure[j][i] = 50000.; }}
```

Например, учитывая следующий фрагмент кода из исходного файла `init.c` и предполагая, что код вызывается с набором процессов `$a`, можно рассмотреть следующее утверждение:

```
assert $a::pressure@"init.c":180 = 50000
```

Это утверждение гарантирует, что каждый элемент в структуре данных набора процессов `$a` равен 50 000 в строке 180 исходного файла `init.c`

Соответственно, *сравнительные утверждения* позволяют сравнивать две отдельные структуры данных во время выполнения.

Следующее утверждение сравнивает данные из `big_var` в `$a` в строке 4300 исходного файла `ref.c` с `large_var` в `$b` в строке 4300 исходного файла `sus.c`.

```
assert $a::big_var@"ref.c":4300=$b::large_var@"sus.c":4300
```

Статистические утверждения - это определяемый пользователем предикаты, состоящие из двух моделей данных в форме либо статистических примитивов (средние

значения, значения стандартного отклонения), либо функциональных моделей (гистограммы, функции плотности)

Статистические утверждения позволяют пользователю сравнивать информацию о шаблонах данных между двумя структурами данных, тогда как более ранние утверждения требовали сравнения точных значений.

Например, можно утверждать, что среднее значение большого набора данных находится между определенными границами до или после вызова функции или что количество элементов в массиве должно находиться в определенном диапазоне.

Определение степени и источников недетерминизма в приложениях MPI с помощью ядер графов

Далее представлен материал, являющийся результатом анализа работы [6].

Проблема Выявление причин сбоев воспроизводимости в приложениях на эксафлопсных платформах.

Крупномасштабные приложения MPI обычно принимают гибкие решения во время выполнения том порядке, в котором процессы обмениваются данными, чтобы улучшить свою производительность. Следовательно, недетерминированные коммуникативные модели стали особенностью этих научных приложений в системах высокопроизводительных вычислений.

Недетерминизм мешает разработчикам отслеживать вариации выполнения программы для отладки. Также сложно воспроизвести результаты при повторных запусках, что затрудняет доверие к научным результатам.

Предложенное решение Фреймворк для определения источников недетерминизма с использованием графов событий.

Описание решения Параллельное выполнение программы моделируется в виде ориентированных графов событий, ядра графов используются, чтобы охарактеризовать изменения межпроцессного взаимодействия от запуска к запуску. Ядра могут количественно определять тип и степень недетерминизма, присутствующего в моделях коммуникации MPI.

Фреймворк позволяет найти первопричины недетерминизма в исходном коде без знания коммуникативных паттернов приложения.

Платформа моделирует недетерминизм в следующие три этапа.

Этап первый. Сбор трассировки выполнения. Фреймворк фиксирует трассировку нескольких выполнений недетерминированного приложения с помощью двух модулей трассировки: CSMPI (фиксирует стек вызовов, связанных с вызовами функций MPI) и DUMPI (фиксирует порядок отправляемых и получаемых сообщений для каждого процесса MPI).

Для каждого выполнения приложения фреймворк генерирует один файл трассировки CSMPI и один файл трассировки DUMPI для каждого процесса MPI (или ранга). Файлы трассировки впоследствии загружаются конструктором графа событий для восстановления порядка сообщений выполнения.

Этап второй. Построение модели графа событий. На втором этапе фреймворк моделирует выполнение недетерминированного приложения в виде ориентированного ациклического графа (DAG), используя файлы трассировки, созданные на первом этапе.

Здесь вершины представляют собой связи point-to-point, такие как отправка и получение сообщения, а направленные ребра представляют отношения между этими событиями. Модели межпроцессного взаимодействия этой формы обычно называются графами событий.

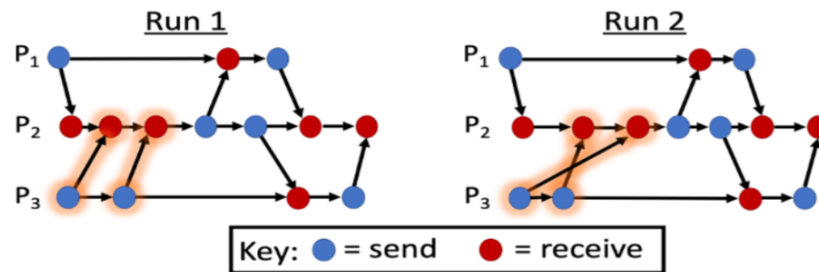


Рис. 5. DGA

Затем используются ядра графов для количественной оценки (несходства) графов событий, тем самым количественно оценивая степень проявления недетерминированности в приложении.

Ядра графов представляют собой семейство методов для измерения структурного сходства графов.

Простыми словами, ядро графа можно рассматривать как функцию, которая подсчитывает совпадающие подструктуры (например, поддеревья) двух входных графов, как показано на рис. 6, сопоставляя пары графов со скалярами, которые количественно определяют, насколько они похожи.

Этап третий. Анализ графа событий. На последнем этапе анализ графа событий позволяет ученым количественно оценить недетерминированность многократного выполнения приложения MPI без каких-либо знаний о коммунитивных моделях приложения MPI.

Подготовлено: *Крехтунова Д.Д. (РК6-73Б), 2021.11.10*

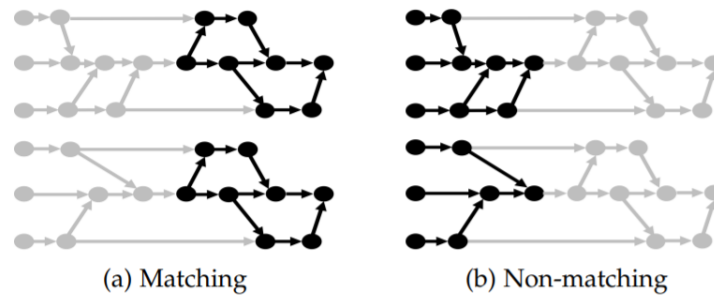


Рис. 6. Сравнение двух графов

2021.11.22: Web-инструменты для древовидного представления ассоциативных массивов, визуализация ассоциативных массивов (первичный обзор литературы)

Ассоциативные массивы

Ассоциативный массив – это массив, в котором обращение к значению осуществляется по ключу (того или иного типа).

Часто в качестве ключа используется не индекс, а строка, задаваемая программистом. Таким образом представить ассоциативный массив можно как набор пар “ключ-значение”. При этом каждое значение связано с определённым ключом.

Поддержка ассоциативных массивов есть во многих интерпретируемых языках программирования высокого уровня, таких, как Perl, PHP, Python, Ruby, Tcl, JavaScript и других.

Реализации ассоциативного массива Простейший способ хранения ассоциативных массивов – список пар (ключ, значение), где *ключ* определяет “индекс” элемента, а *значение* – значение элемента с этим индексом.

Наиболее популярными являются реализации ассоциативных массивов, основанные на различных деревьях поиска. Так, например, в стандартной библиотеке STL языка C++ контейнер `map<K,T>` реализован на основе красно-чёрного дерева [?]. В языках Java, Ruby, Tcl, Python используется один из вариантов хеш-таблицы [?]. Известны и другие реализации (aaa, mmm, ...).

Операции с деревом работают быстрее. При реализации на основе списков все функции требуют $O(n)$ операций, где n – количество элементов в рассматриваемой структуре. Операции над деревьями же требуют $O(h)$, где h – максимальная глубина дерева.

Данные в дереве хранятся в его вершинах. В программах вершины дерева обычно представляют структурой, хранящей данные и две ссылки на левого и правого сына.

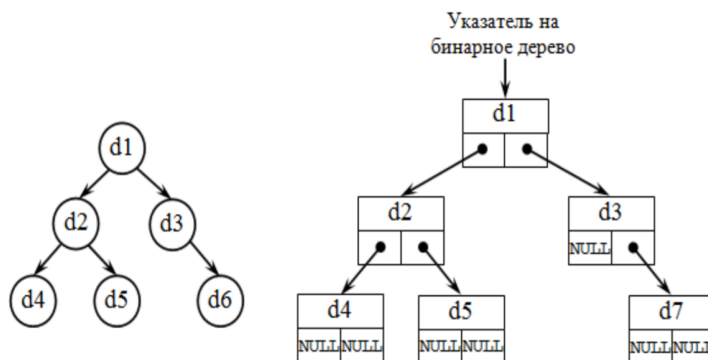


Рис. 7. Пример представления бинарного дерева

Набор библиотек TnT для web-визуализации деревьев и аннотаций на основе трассировок

В статье [7] представлен набор библиотек, предназначенных для web-визуализации деревьев и трассировок.

В статье говорится в первую очередь о визуализации биологических данных в веб-приложениях. Но представленные библиотеки не имеют узкой направленности и могут использоваться для разных целей.

Библиотеки TnT (англ. Trees and Tracks) предназначены для создания настраиваемых, динамических и интерактивных визуализаций деревьев и аннотаций на основе треков.

Библиотеки написаны на Javascript с использованием библиотеки D3, которая сама по себе является мощным инструментом визуализации данных. Она использует стандарты масштабируемой векторной графики (SVG), HTML и CSS.

Ниже приведено краткое описание библиотек TnT, непосредственно связанных с визуализацией деревьев.

- *TnT Tree*

Эта библиотека построена на основе кластерного расположения D3 (D3 cluster layout) и позволяет создавать динамические и интерактивные деревья. Он состоит из нескольких настраиваемых элементов: макета, определяющего общую форму дерева, узлов дерева в которых можно изменять форму, размер и цвет, ярлыков, состоящих из текста или изображений и данных для загрузки объектов Javascript или строк newick / nhx.2.2 TnT Tree Node.

PhyloCanvas - аналогичный проект, предлагающий средства для визуализации деревьев. В качестве основной технологии в нем используется Canvas. Но библиотеки TnT более универсальны и поддерживают интеграцию с другими библиотеками. Документацию и примеры для TnT Tree можно найти по ссылке <http://tntvis.github.io/tnt.tree/>.

- *TnT Tree Node*

Эта библиотека предоставляет методы для управления деревом на уровне данных и используется TnT Tree, хотя также может использоваться и независимо. Методы, включенные в TnT Tree Node, варьируются от вычисления наименьшего общего предка набора узлов до извлечения поддеревьев. Документацию для этой библиотеки можно найти как часть документации библиотеки TnT Tree.

Программное обеспечение EMPress интерактивного и исследовательского анализа многомерных наборов данных на основе деревьев

В работе [8] представлен интерактивный web-инструмент EMPress для визуализации деревьев в контексте микробиома, метаболома и других областей. EMPress предоставляет широкие функциональные возможности, такие как анимация объектов, наряду со стандартными функциями визуализации дерева.

EMPRESS реализован в виде подключаемого модуля QIIME 2 (или отдельной программы Python, которую можно использовать вне QIIME 2), способной создавать HTML-документы с автономным пользовательским интерфейсом визуализации. Кодовая база состоит из компонента Python и компонента JavaScript. Кодовая база Python отвечает за проверку данных, предварительную обработку, фильтрацию и форматирование. Взаимодействие с пользователем, рендеринг и генерация рисунков обрабатываются базой кода JavaScript.

Кодовая база Python EMPRESS использует такие модули, как NumPy, SciPy, Pandas, Click, Jinja2, scikit-bio, формат BIOM и EMPEROR.

В кодовой базе JavaScript используются Chroma.js, FileSaver.js, glMatrix, jQuery, Require.js, Spectrum, и Underscore.js.

Программный инструмент Treemap визуализации иерархических структур

В статье [9] представлена интерактивная версия Treemap.

В теории графов дерево – это особый тип графа, который связан и ацикличесок [?]. Обычно деревья представляются визуально с помощью диаграмм узлов и связей (древовидных диаграмм). В деревьях ребра присутствуют только между соседними слоями, и, следовательно, деревья наилучшим образом подходят для представления иерархических данных, для которых характерно расположение элементов на различных уровнях относительно друг друга: “ниже”, “выше” или “на одном уровне”.

Treemap - это метод визуализации иерархических структур. Используя этот метод, можно отобразить дерево с миллионами узлов в ограниченном пространстве. Основная идея, лежащая в основе этого метода визуализации, состоит в том, чтобы выделять прямоугольники для родительских узлов, а для дочерних узлов блоки (прямоугольники) в соответствующем родительском прямоугольнике.

Интерфейс создавался с использованием html / css с jQuery для обработки событий, связанных с кликами. Входными данными для интерфейса является дерево родительских указателей (parent pointer tree - структура данных N-арного дерева, в которой каждый узел имеет указатель на свой родительский узел, но не указывает на дочерние узлы).

Web-инструмент DoubleRecViz для визуализации согласования деревьев транскриптов и генов

В статье [1] представлен веб-инструмент для визуализации согласований между филогенетическими деревьями (деревья, отражающее эволюционные взаимосвязи между различными видами, имеющими общего предка).

В статье описан формат DoubleRecViz, основанный на формате phyloXML (XML, предназначенный для описания филогенетических деревьев и связанных с ними данных).

DoubleRecViz написан на Python и использует библиотеку Dash, которая предоставляет функции динамической визуализации веб-данных. Dash является связкой Flask, React.js, HTML и CSS.

Приложения на Dash — веб-серверы, которые запускают Flask и связывают пакеты JSON через HTTP-запросы. Интерфейс Dash формирует компоненты, используя React.js.

Компоненты Dash — это классы Python, которые кодируют свойства и значения конкретного компонента React и упорядочиваются как JSON.

Полный набор HTML-тегов также обрабатывается с помощью React, а их классы Python доступны через библиотеку. CSS и стили по умолчанию хранятся вне базовой библиотеки, чтобы сохранить принцип модульности и независимого управления версиями.

Подготовлено: *Крехтунова Д.Д.* (ПК6-73Б),
2021.11.22

2 Разработка web-ориентированного редактора графовых моделей

2021.10.05: Обзор языка описания графов DOT

Язык описания графов DOT предоставляется пакетом утилит Graphviz (Graph Visualization Software). Пакет состоит из набора утилит командной строки и программ с графическим интерфейсом, способных обрабатывать файлы на языке DOT, а также из виджетов и библиотек, облегчающих создание графов и программ для построения графов. Более подробно будет рассмотрена утилита dot.

dot - инструмент для создания многоуровневого графа с возможностью вывода изображения полученного графа в различных форматах (PNG, PDF, PostScript, SVG и др.).

Установка graphviz

Linux: `sudo apt install graphviz`

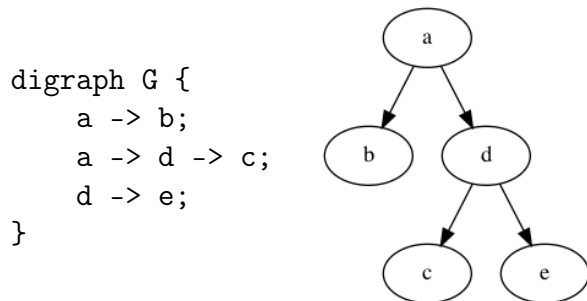
MacOS: `brew install graphviz`

Вызов всех программ Graphviz осуществляется через командную строку, в процессе ознакомления с языком использовалась следующая команда

```
dot -Tpng <pathToDotFile> -o <imageName>
```

В результате выполнения этой команды будет создано изображение графа в формате png

Пример описания простого графа



Более подробная информация с примерами представлена в обзоре литературы, который находится по следующему пути:

01 - Курсовые проекты/2021-2022 - Разработка web-ориентированного редактора графовых моделей /0 - Обзор литературы/

Подготовлено: *Ершов В. (ПК6-72Б), 2021.10.05*

3 Реализация поддержки различных стратегий распараллеливания в рамках графоориентированного программного каркаса

4 Реализация графоориентированной технологии определения бизнес-логики работы пользователя в системе

Список литературы

- [1] Frank Eichinger, Klemens Bohm, and Matthias Huber. Mining Edge-Weighted Call Graphs to Localise Software Bugs // Lecture Notes in Computer Science. 2008. P. 333–348.

- [2] A. Pop, M. Sjolund, A. Asghar, P. Fritzson, F. Casella. Integrated Debugging of Mod-
elica Models // Modeling, Identification and Control. 2014. Vol. 35, no. 2. P. 93–107.
- [3] Alan Humphrey, Qingyu Meng, Martin Berzins, Diego Caminha B. de Oliveira, Zvonimir
Rakamaric, Ganesh Gopalakrishnan. Systematic debugging methods for large-scale hpc
computational frameworks // Computing in Science and Engineering. 2014. Vol. 16,
no. 3. P. 48–56.
- [4] Minh Ngoc Dinh, David Abramso1, Chao Jin, Andrew Gontarek, Bob Moench, Luiz
DeRose. A data-centric framework for debugging highly parallel applications // Software
- Practice and Experience. 2013. Vol. 45, no. 4. P. 501–526.
- [5] Dylan Chapp, Nigel Tan, Sanjukta Bhowmick, Michela Taufer. Identifying Degree and
Sources of Non-Determinism in MPI Applications via Graph Kernels // IEEE Transac-
tions on Parallel and Distributed Systems. 2021. Vol. 32, no. 12. P. 2936–2952.
- [6] Miguel Pignatelli. TnT: a set of libraries for visualizing trees and track-based annotations
for the web // Bioinformatics. 2016. Vol. 32, no. 16. P. 2524–2525.
- [7] Cantrell K., Fedarko M.W., Rahman G., McDonald D., Y.,Zaw T., Gonzalez A., Janssen
S., Estaki M., Haiminen N., Beck K.L., Zhu Q. Empress enables tree-guided, interactive,
and exploratory analyses of multi-omic data sets // mSystems. 2021. Vol. 6, no. 2.
- [8] Jadeja M., Kanakia H., Muthu R. Interactive Labelled Object Treemap: Visualization
Tool for Multiple Hierarchies // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020.
P. 499–508.
- [9] Esaie Kuitche, Yanchun Qi, Nadia Tahiri, Jack Parmer,Aïda Ouangraoua . Dou-
bleRecViz: A Web-Based Tool for Visualizing Transcript-Gene-Species tree reconcili-
ation // Bioinformatics. 2021. Vol. 37, no. 13. P. 1920–1922.