

ИТМО

Программное обеспечение высоконагруженных систем

Можжаев Андрей Михайлович

Выпускная квалификационная работа

***Оптимизация строковой решетки для статического
анализа кода на базе абстрактной интерпретации***

Уровень образования: магистратура

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Дмитрий Сергеевич Шалымов

Рецензент:

зав. лаб. 37 в ИПУ РАН,

д.т.н Антон Викторович Уткин,

Санкт-Петербург

2025 г.

Содержание

Введение	3
Постановка задачи	6
Обзор предметной области	7
Выводы	8
Заключение	9
Благодарность	10
Список литературы	11

Введение

Современное программное обеспечение становится все более сложным и масштабным, что увеличивает вероятность ошибок, возникающих в процессе разработки. Даже незначительные на первый взгляд ошибки могут привести к серьезным последствиям — от сбоев в пользовательских приложениях до срывов критически важных систем, таких как медицинское оборудование или системы управления транспортом. Именно поэтому проблема обеспечения надежности программных систем стоит особенно остро. Один из эффективных способов борьбы с потенциальными ошибками — применение методов статического анализа кода.

Статический анализ позволяет обнаружить широкий спектр ошибок и уязвимостей на ранней стадии разработки, еще до выполнения программы. В отличие от динамического анализа, который исследует поведение программы во время исполнения на различных входных данных, статический анализ работает только с исходным кодом или промежуточным представлением программы. Это дает возможность проверять весь возможный спектр входных данных и состояний программы, выявляя проблемы, которые могли бы проявиться лишь в редких и трудновоспроизводимых сценариях выполнения.

Одним из наиболее теоретически обоснованных и мощных подходов к статическому анализу является метод абстрактной интерпретации. Этот метод основан на идее упрощения множества всех возможных состояний программы путем перехода от конкретных значений переменных к их абстрактным представлениям в специально сконструированном математическом пространстве — абстрактном домене. В таком представлении каждое абстрактное значение описывает сразу множество возможных конкретных значений, а операции над абстрактными элементами являются овераппроксимацией (over-approximation) реального поведения программы.

Овераппроксимация означает, что абстрактный анализ учитывает не только те сценарии, которые реально могут возникнуть, но и теоретически возможные, но недостижимые состояния. Это свойство важно, поскольку оно позволяет гарантировать безопасность анализа: если статический анализ на основе абстрактной интерпретации не обнаружил ошибок, то можно быть

уверенным, что в реальном исполнении программы аналогичных ошибок действительно не произойдет — ни при каких входных данных и сценариях выполнения. Такой подход позволяет обнаруживать целые классы потенциальных ошибок, включая обращения к неинициализированным переменным, выходы за границы массивов, деления на ноль и другие критические дефекты.

Неподвижные точки и решетки

Фундаментальным математическим понятием в абстрактной интерпретации являются неподвижные точки. При выполнении статического анализа программа рассматривается как множество состояний, которые изменяются при выполнении инструкций. Однако особую сложность представляет анализ циклов и рекурсий, поскольку количество итераций заранее неизвестно и потенциально бесконечно. Полный перебор всех возможных состояний и проходов цикла невозможен на практике из-за комбинаторного взрыва.

Именно здесь применяется вычисление неподвижной точки — состояния программы, при котором дальнейшее выполнение цикла не приводит к появлению новых абстрактных состояний. В контексте абстрактной интерпретации это означает нахождение верхней границы множества возможных значений, которые могут принимать переменные после выполнения неопределенного числа итераций цикла. Такой подход позволяет "замкнуть" цикл, остановив анализ в тот момент, когда достигнута стабильность (фиксация значений) в абстрактном пространстве.

Чтобы анализ завершился за конечное время, применяется механизм ускорения сходимости — так называемый widening (расширение), который грубо обобщает накопленные результаты и ускоряет достижение неподвижной точки, жертвуя при этом частью точности ради производительности.

Вся эта процедура возможна благодаря тому, что абстрактные значения организованы в решетку — математическую структуру, определяющую отношения между абстрактными элементами и операции над ними. Решетка — это частично упорядоченное множество, в котором для любых двух элементов можно определить наименьшую общую верхнюю границу (join) и наибольшую общую нижнюю границу (meet). Эти операции позволяют объединять и

пересекать абстрактные состояния, обобщать или уточнять информацию в процессе анализа.

Примером простой решетки является множество булевых значений \perp , true, false, \top , где \perp — невозможное состояние, \top — "неизвестно" а операции join и meet позволяют вычислять общие свойства логических выражений.

Постановка задачи

Обзор предметной области

SimScale [5], EnergyPlus [6], TRNSYS [7]

Выводы

В итоге был разработан метод, который помогает целесообразно расположить датчик в помещении. Хотя он и не дает глобальной оптимизации, но конструктивно каждый шаг нашей процедуры направлен на улучшение качества системы, поэтому можно говорить о субоптимальном результате. С его помощью можем перейти от более сложной модели CFD к более простой.

Тем не менее, есть еще ряд проблем, над которыми стоит подумать. Одной из них является время года. Например, зимой температура снаружи гораздо ниже, чем внутри. То есть полученная регрессия для летнего периода не будет работать, и придется перерасчитывать коэффициенты. В том числе, временной сдвиг может стать другим, также как и само расположение датчика. Одним из возможных решений может стать усредненный критерий для разных времен года. На самом деле, даже летом для дневного и ночного периода есть разница температур, из-за которой может оказаться так, что ночью расположение датчика одно, а днем другое.

Еще одним вопросом может быть выбор критерия. Возможно стоит также учитывать и усредненную температуру по всем точкам. Тем самым точка у окна, температура в которой наиболее близкая к внешней, может быть достаточно далека от средней температуры, а значит и значение в ней будет меньше влиять на остальные.

Проверить полученный метод на практике пока не удалось, так как для этого нужно оснастить помещение датчиками и провести замеры. Однако, в будущем планируется применение этой процедуры для оборудования испытательного полигона, который сейчас находится на стадии строительства. То есть эффективность будет позже проверена реальными измерениями.

Заключение

В результате работы был разработан алгоритм построения упрощенной динамической модели характеристик воздуха в помещении. С его помощью можно находить расположение датчика, показания в котором позволят улучшить собираемые данные, что повысит качество прогноза.

Была создана упрощенная модель «Демонстрационного стенда Умного дома», в которой учитывается взаимодействие с внешней средой, а также солнечная радиация. Осуществлен переход от численной модели к более простой, пригодной для быстрого расчета.

На данный момент реализован перебор потенциальных точек расположения датчика. В будущем этот перебор можно оптимизировать, реализовав градиентный поиск. С его помощью сможем быстрее находить подходящие точки для больших помещений. Хотя в таком случае мы найдем лишь локальные максимумы, этот результат наоборот может сыграть нам на руку, так как тем самым возможно получится решить проблему разбиения большого зала, который не покрыть одним датчиком, на зоны.

Полученный алгоритм можно найти по ссылке на GitHub: <https://github.com/mozhayka/microclimate>. Модели помещения в COMSOL также можно найти по этой ссылке.

Благодарность

Автор выражает особую благодарность Юрию Михайловичу Рассадину за регулярное внимание и наставления к данной работе

Список литературы

- [1] Computational Methods for Fluid Dynamics
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-56026-2>
- [2] COMSOL Multiphysics®.
<https://www.comsol.ru>.
- [3] Пащенко А.Ф., Рассадин Ю.М. Оценка взаимосвязи параметров микроклимата с учетом тепловой инерции внешних стен здания / Труды 15-й Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем"(MLSD'2022). М.: ИПУ РАН, 2022. С. 1216-1224.
- [4] 2017 ASHRAE Handbook Fundamentals SI
<https://studylib.es/doc/8956387/2017-ashrae-handbook-fundamentals-si.pdf>
- [5] SimScale
<https://www.simscale.com>
- [6] EnergyPlus
<https://energyplus.net>
- [7] TRNSYS
<https://trnsys.com>
- [8] Оптимизация HVAC-систем с помощью моделирования
<https://www.comsol.ru/paper/space-heating-and-ventilation-simulation-for-an-office-room-94451>
- [9] SolidWorks
<https://www.solidworks.com>
- [10] FreeCAD
<https://freecad.ru>
- [11] STL
[https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))

[12] STEP

https://en.wikipedia.org/wiki/ISO_10303-21

[13] COMSOL Documentation, Heat Flux

https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/heat_ug_ht_features.09.048.html

[14] COMSOL, Solar radiation example

<https://www.comsol.com/model/sun-s-radiation-effect-on-two-coolers-placed-under-a-parasol-12825>

[15] Коэффициент корреляции Пирсона

https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.80372905-6474ca53-4b8891be-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient

[16] Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement

<https://arxiv.org/pdf/1806.08999v1.pdf>

[17] A Review of CFD Analysis Methods for Personalized Ventilation (PV) in Indoor Built Environments

https://www.researchgate.net/publication/334853289_A_Review_of_CFD_Analysis_Methods_for_Personalized_Ventila