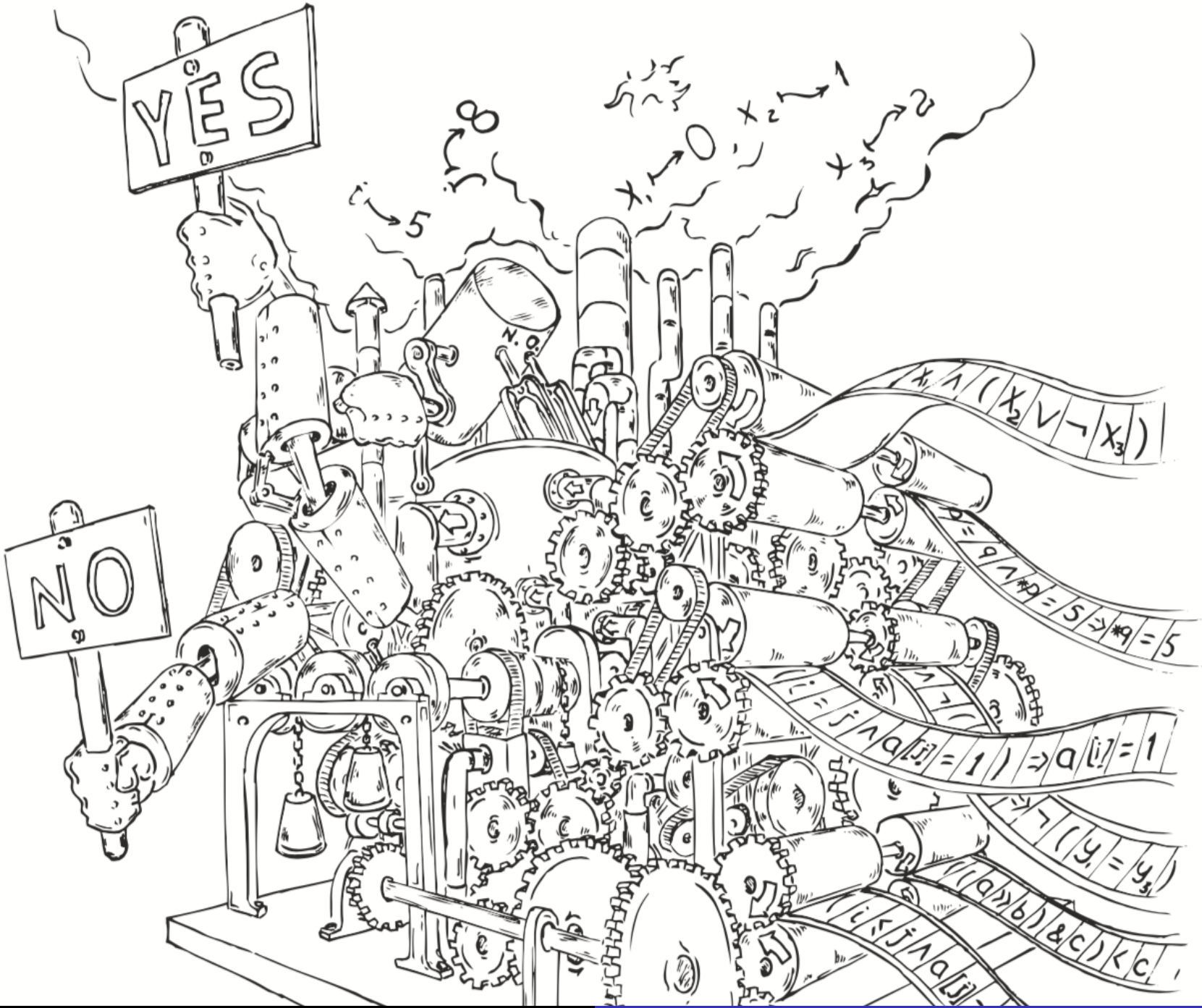

YES
NO

Задачи разрешимости логических формул и приложения
Лекция 11. Символическое исполнение

Роман Холин

Московский государственный университет

Москва, 2022

Мотивация

- Хочется автоматизировать генерацию тестовых примеров

Мотивация

- Хочется автоматизировать генерацию тестовых примеров
- Хочется, чтобы тесты посещали все строчки кода (LOC метрика)

Мотивация

- Хочется автоматизировать генерацию тестовых примеров
- Хочется, чтобы тесты посещали все строчки кода (LOC метрика)
- Хочется, чтобы тесты посещали все пути обхода программы

Что можно делать

- Dynamic analysis
- Program correctness
- Test generations
- Taint analysis

Конкретное исполнение (Concrete execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
4	4	0

Конкретное исполнение (Concrete execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      //if (x > y) {
4      //    t = x;
5      //} else {
6          t = y;
7      //}
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
4	4	4

Конкретное исполнение (Concrete execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
2	1	0

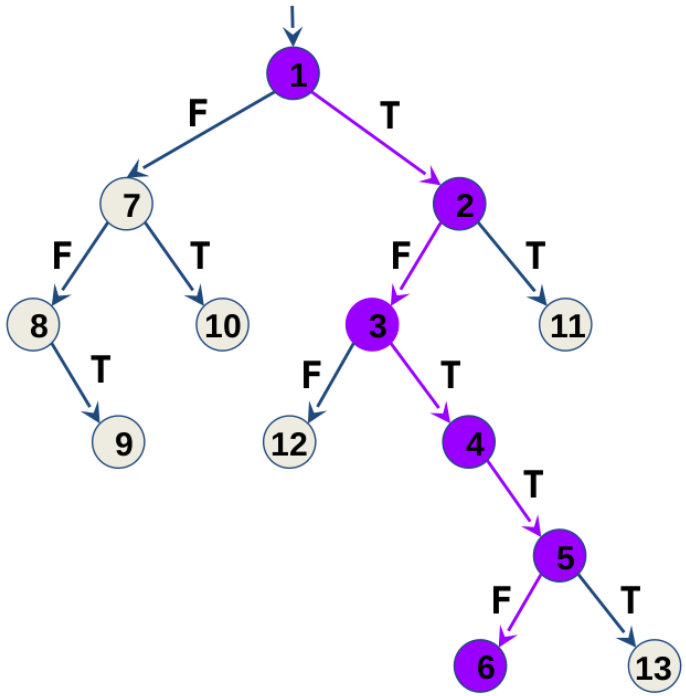
Конкретное исполнение (Concrete execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      //if (x > y) {
4          t = x;
5      //} else {
6      //    t = y;
7      //}
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
2	1	2

Пути исполнения программы

- Программа может быть представленна в виде бинарного дерева - т.н. Вычислительного дерева
- Каждая вершина - выполнение условного оператора
- Каждое ребро - выполнение последовательнисти команд, которые не являются условным оператором
- Кадый путь от корня - делит множество входных данных на классы эквивалентности



Пример дерева

```
1  void test(int x, int y) {
2      if (2*y == x) {
3          if (x <= y+10) {
4              printf("OK");
5          } else {
6              printf("not OK");
7              assert false;
8          }
9      } else {
10         print("OK");
11     }
12 }
```

Существующие подходы

```
1  void test(int x) {
2      if (x == 94389) {
3          assert false;
4      }
5  }
```

- Рандомизированное тестирование
- Проблема: вероятность ошибка очень мала

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
x	y	0

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
x	y	t_0

$$t_0 = \begin{cases} x & x > y \\ y & x \leq y \end{cases}$$

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
x	y	t_0

$$t_0 = \begin{cases} x & x > y \\ y & x \leq y \end{cases}$$

$$t_0 < x?$$

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
x	y	t_0

$$t_0 = \begin{cases} x & x > y \\ y & x \leq y \end{cases}$$

$$\begin{cases} x > y \implies t_0 = x \implies t_0 \geq x \\ x \leq y \implies t_0 = y \implies t_0 \geq x \end{cases}$$

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x - 1;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
x	y	t_0

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x - 1;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
x	y	t_0

$$t_0 = \begin{cases} \text{x - 1} & x > y \\ \text{y} & x \leq y \end{cases}$$

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      //if (x > y) {
4          t = x - 1;
5      //} else {
6      //    t = y;
7      //}
8      //if (t < x) {
9          assert false;
10     //}
11 }
```

X	Y	T
x	y	t_0

$$t_0 = \begin{cases} x - 1 & x > y \\ y & x \leq y \end{cases}$$

$$\begin{cases} x > y \implies t_0 = x - 1 \implies t_0 < x \\ x \leq y \implies t_0 = y \implies t_0 \geq x \end{cases}$$

$x > y$ - solution

Символическое исполнение (Symbolic execution)

```
1  void testme(int x) {
2      if (pow(2,x) % c == 17) {
3          printf("not OK");
4          assert false;
5      } else
6          printf("OK");
7  }
```

Concolic execution

Concolic execution (или dynamic symbolic execution):

- Начнем с рандомных входных данных
- Поддерживаем конкретный и символьные переменные

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
x	y	t_0

$$t_0 = \begin{cases} x & x > y \\ y & x \leq y \end{cases}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, 0)$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, 0)$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, 0)$

$\{ F1 = not(x > y)$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, 0)$

$\{\ F1 = not(x > y)$

$SMT\_Solver(\text{not}\ F1) \rightarrow (x = 1, y = 0)$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, 0)$

$\{ F1 = not(x > y)$

$SMT\_Solver(\text{not}$

$F1) \rightarrow (x = 1, y = 0)$

$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, 0)$

$$\{\ F1 = not(x > y)$$

$$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, y)$

$$\{\ F1 = not(x > y)$$

$$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, y)$

$$\{\ F1 = not(x > y)$$

$$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, y)$

$$\{\ F1 = not(x > y)$$

$$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, y)$

$$\begin{cases} F1 = not(x > y) \\ F2 = not(y < x) \end{cases}$$

$$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, y)$

$$\begin{cases} F1 = not(x > y) \\ F2 = not(y < x) \end{cases}$$

$$SMT\_Solver(F1 \text{ and not } F2) \rightarrow UNSAT$$

$$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

X	Y	T
$(0, x)$	$(0, y)$	$(0, y)$

$$\begin{cases} F1 = not(x > y) \\ F2 = not(y < x) \end{cases}$$

$$queue = \{(x = 1, y = 0)\}$$

Concolic execution

```
1  void foo(int x, int y) {
2      int t = 0;
3      if (x > y) {
4          t = x;
5      } else {
6          t = y;
7      }
8      if (t < x) {
9          assert false;
10     }
11 }
```

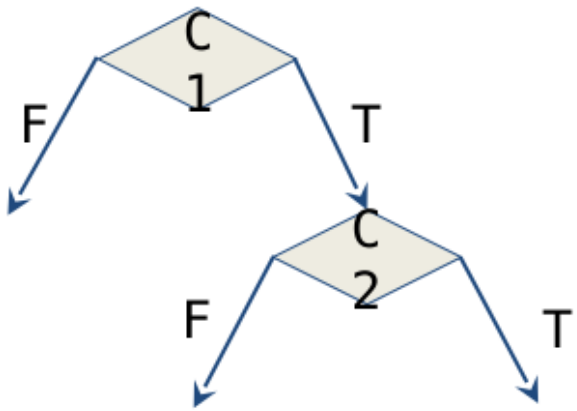
X	Y	T
$(1, x)$	$(0, y)$	$(0, 0)$

$queue = \{\}$

Пример

Какие ограничения могут повстречатся при consolic execution?

- ☐ C1
- ☐ C2
- ☐ ¬C1
- ☐ ¬C2
- ☐ C1 ∧ C2
- ☐ C1 ∧ ¬C2
- ☐ ¬C1 ∧ C2
- ☐ ¬C1 ∧ ¬C2



Пример

```
1  int test(int x) {
2      int[] A = { 5, 7, 9 };
3      int i = 0;
4      while (i < 3) {
5          if (A[i] == x) {
6              break;
7          }
8          i++;
9      }
10     return i;
11 }
```

Какие ограничения появлялись и были разрешены солвером?

Пример

```
1  int foo(int v) {
2      return secure_hash(v);
3  }
4
5  void test(int x, int y) {
6      if (x != y)
7          if (foo(x) == foo(y))
8              assert;
9  }
```

Можно символические переменные заменить на конкретные

Преимущества и недостатки Consolic Execution

- Может никогда не остановиться
- Метод полный - если мы достигаем ошибки, то программа достигает её на некоторых данных
- Не надежный - если анализ останавливается и не нашёл ошибок, то это не значит, что их нет

Реализация

1	a = b + c

Реализация

```
1  class concolic_int(int):
2  def __new__(cls, val, sym):
3      self =
4       super(concolic_int, cls).__new__(cls, val)
5      self.__val = val
6      self.__sym = sym
7      return self
8  def __add__(self, other):
9      if isinstance(other, concolic_int):
10         value = self.__val + other.__val
11         symbolic = self.__sym + "+" + other.__sym
12     else:
13         value = self.__val + other
14         symbolic = self.__sym + "+" + str(other)
15     return concolic_int(value, symbolic)
```

Реализация

Как int заменить на concolic_int?

Реализация

1	a = b + c

Реализация

```
1  a = plus(b, c)
```

Реализация

```
1  function plus(x, y) {
2      if (x isinstanceof Concolic) {
3          if (y isinstanceof Concolic) {
4              return new Concolic(
5                  x._val + y._val,
6                  x._sym + "+" + y._sym
7              );
8          } else {
9              return new Concolic(
10                 x._val + y,
11                 x._sym + "+" + y.toString()
12             );
13         }
14     } else {
15         ....
16     }
17 }
```

Реализация

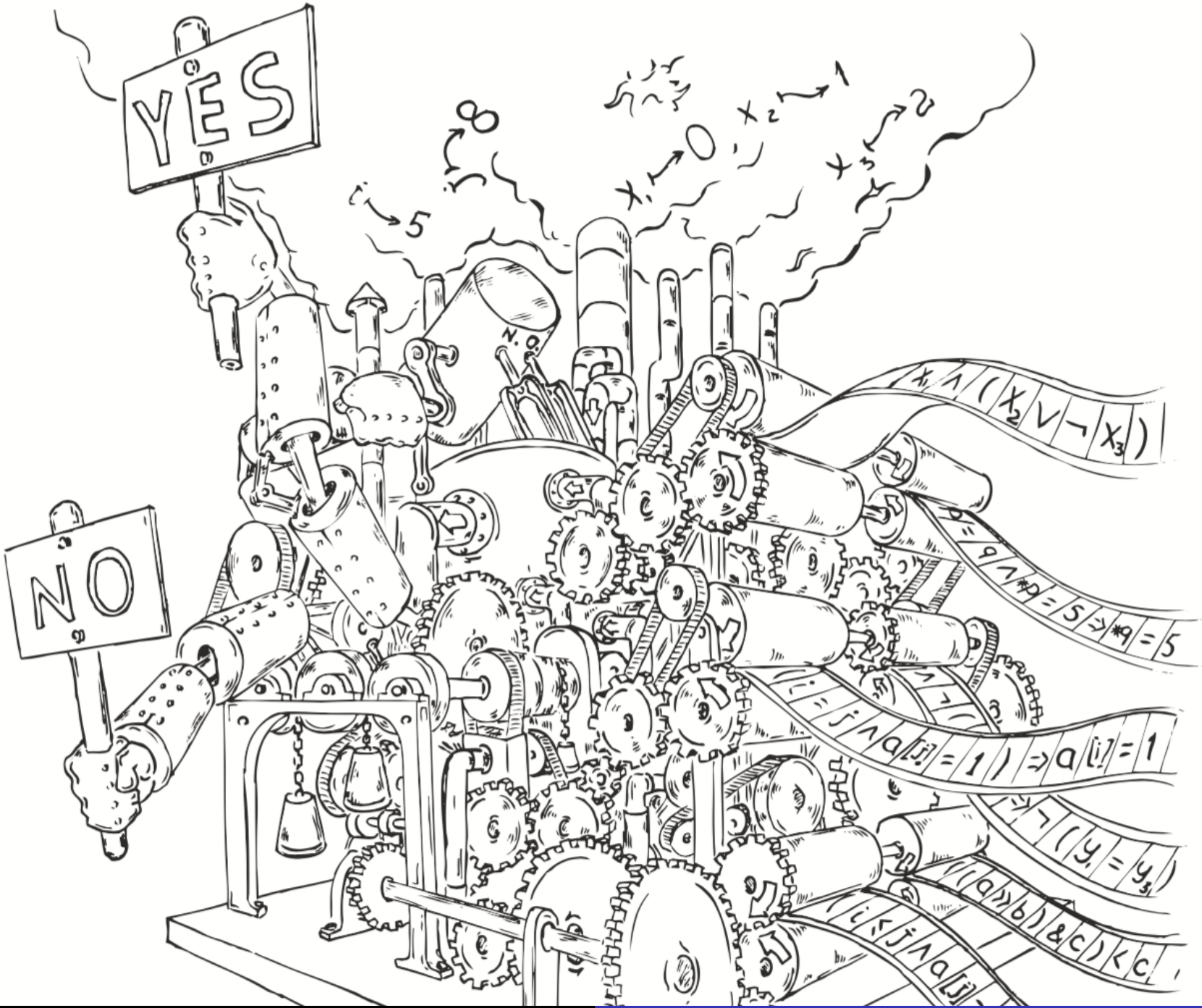
Как кодировать пути?

Examples

- KLEE: LLVM (C family of languages)
- PEX: .NET Framework
- CUTE: C
- jCUTE: Java
- Jalangi: Javascript
- Jalangi2 + ExpoSE: Javascript
- SAGE and S2E: binaries (x86, ARM, ...)

Links

- https://www.youtube.com/watch?v=yRVZPvHYHzw - MIT lecture
- Symbolic Execution and Program Testing. James C. King
- SAGE: Whitebox Fuzzing for Security Testing. Patrice Godefroid, Michael Y. Levin, and David A. Molnar
- Jalangi: A Selective Record-Replay and Dynamic Analysis Framework for JavaScript. Koushik Sen, Swaroop Kalasapur, Tasneem Brutch, Simon Gibbs
- Sound Regular Expression Semantics for Dynamic Symbolic Execution of JavaScript. Blake Loring, Duncan Mitchell, Johannes Kinder


YES
NO