

Guião para aula laboratorial de Verificação Formal (2020/21)

SMT solving

O objectivo desta aula é a familiarização com as teorias e lógicas SMT-LIB de inteiros, bitvectors e arrays, as mais usadas em verificação de software, através de exemplos que, na sua maior parte, não são ainda no contexto do software.

Deverá ter instalado alguns SMT solvers. Recomendamos, pelo menos, o `z3` e o `cvc4`.

Caso não tenha ainda conseguido instalar os solvers poderá utilizar a versão online do `z3` disponibilizada em <https://rise4fun.com/Z3>.

O tutorial online do `z3` é uma forma rápida e conveniente de tomar conhecimento de muitos outros detalhes do standard SMT-LIB 2.0. Aconselhamos que os explore. A partir do site do SMT-LIB poderá aceder a muita outra informação sobre o standard, solvers e documentação.

1 Um exemplo simples

Comecemos por usar um SMT solver para nos ajudar a responder à seguinte pergunta:

Sejam x , y e z inteiros positivos, distintos entre si. Se o valor de y não poder exceder 3, que valores poderão ter as variáveis x , y e z para que a sua soma dê 8?

Vamos usar a lógica QF_LIA (*quantifier-free linear integer arithmetic*) para este caso. O ficheiro `equacoes.smt2` no formato SMT-LIBv2, contém a descrição das restrições impostas pelo problema:

```
(set-logic QF_LIA)

(declare-fun x () Int)
(declare-fun y () Int)
(declare-fun z () Int)

(assert (> x 0))
(assert (> y 0))
(assert (> z 0))
(assert (distinct x y z))
(assert (= (+ x y z) 8))
(assert (<= y 3))

(check-sat)
(get-model)
; (get-value (x y))
```

Notas:

- Constantes, funções, proposições e predicados são todos declarados da mesma forma, com `declare-fun`. Apenas o tipo varia.
- As restrições do problema são declaradas com `assert`.
- O comando `(check-sat)` testa a satisfazibilidade das restrições.
- Finalmente, `(get-model)` imprime o modelo obtido caso a resposta seja SAT.
- Se desejarmos podemos, em vez de imprimir o modelo na sua totalidade, imprimir apenas algumas variáveis, substituindo `(get-model)`, por exemplo, por `(get-value (x y))`.
- `O ;` é o início de uma linha de comentário.

Podemos agora invocar um solver com este ficheiro. Por exemplo, o `z3`:

```
$ z3 equacoes.smt2
sat
(model
  (define-fun z () Int
    2)
  (define-fun y () Int
    1)
  (define-fun x () Int
    5)
)
```

A solução (modelo) calculada consiste em definições das 3 constantes de tipo inteiro e dá-nos uma resposta para o problema: $x = 5$, $y = 1$, $z = 2$. Haverá outras soluções?

Podemos tentar ver a solução que o `cvc4` propõe:

```
$ cvc4 equacoes.smt2
sat
(error "Cannot get model when produce-models options is off.")
```

Note que existem diferenças na forma como é feita a invocação dos diferentes solvers. Incluindo na invocação a opção referida,

```
$ cvc4 --produce-models equacoes.smt2
sat
(model
  (define-fun x () Int 1)
  (define-fun y () Int 3)
  (define-fun z () Int 4)
)
```

vemos que o modelo calculado pelo `cvc4` é $x = 1$, $y = 3$, $z = 4$. Uma solução diferente da que foi obtida com o `z3`. Portanto, parece haver várias soluções possíveis.

Se quisermos obter os vários modelos alternativos para o problema, teremos que ir (gradualmente) incluindo restrições que excluam a solução apresentada pelo solver.

Usando esta técnica, calcule agora todas as soluções possíveis do problema.

2 Unicorn puzzle

Vamos trabalhar com a lógica mais simples, QF_UF, que inclui apenas a teoria Core (lógica Booleana) com funções não-interpretadas (UF) e proíbe a utilização de quantificadores (QF).

Para isso, recorde o enigma do unicórnio que consideramos na aula sobre SAT:

- *If the unicorn is mythical, then it is immortal.*
- *If the unicorn is not mythical, then it is a mortal mammal.*
- *If the unicorn is either immortal or a mammal, then it is horned.*
- *The unicorn is magical if it is horned.*
- *Is the unicorn magical? Is it horned? Is it mythical?*

Resolvemos o problema com o auxílio de 5 variáveis proposicionais, correspondentes a 5 propriedades dos unicórnios. Também o podemos fazer com um SMT solver. O ficheiro `unicornpuzzle.smt2` no formato SMT-LIBv2, contém a descrição das restrições acima:

```
(set-logic QF_UF)

(declare-fun mythical () Bool)
(declare-fun immortal () Bool)
(declare-fun mammal () Bool)
(declare-fun horned () Bool)
(declare-fun magical () Bool)

(assert (=> mythical immortal))
(assert (=> (not mythical) (and (not immortal) mammal)))
(assert (=> (or immortal mammal) horned))
(assert (=> horned magical))
```

Note que não é necessária a conversão para CNF! Podemos utilizar directamente as conectivas `or`, `and`, `not`, e `=>` (sintaxe prefixa).

Temos agora várias perguntas a colocar sobre neste contexto:

- *Is the unicorn magical? Is it horned? Is it mythical?*

É muito usual queremos explorar vários problemas semelhantes que compartilham várias definições e asserções. Podemos usar os comandos `(push)` e `(pop)` para fazer isso. Os SMT solvers mantêm uma stack global de declarações e asserções. O comando `(push)` cria um novo escopo, salvando o tamanho atual da stack. O comando `(pop)` remove qualquer afirmação ou declaração executada entre ele e o `(push)` correspondente. O comando `(check-sat)` opera no conteúdo da stack global.

Analyze o restante conteúdo do ficheiro `unicornpuzzle.smt2` e teste-o em diferentes SMT solvers (por exemplo, o `z3` e o `cvc4`).

3 Sudoku

Os puzzles Sudoku são problemas de colocação de números inteiros entre 1 e N^2 numa matriz quadrada de dimensão N^2 , por forma a que cada coluna e cada linha contenha todos

os números, sem repetições. Além disso, cada matriz contém N^2 sub-matrizes quadradas disjuntas, de dimensão N , que deverão também elas conter os números entre 1 e N^2 .

Cada problema é dado por uma matriz parcialmente preenchida, cabendo ao jogador completá-la. Exemplo de um problema para $N = 2$, e uma possível solução:

4		1	
	2		
		3	
	4		1

4	3	1	2
1	2	4	3
2	1	3	4
3	4	2	1

O problema pode ser codificado através de um conjunto de N^4 constantes de tipo inteiro, correspondentes às posições da matriz, e escrevendo:

- $2 \times N^4$ desigualdades para os limites inferior e superior das constantes;
- N^2 restrições do tipo “todos diferentes”, uma para cada linha da matriz;
- N^2 restrições do tipo “todos diferentes”, uma para cada coluna da matriz;
- N^2 restrições do tipo “todos diferentes”, uma para cada sub-matriz da matriz.

Acrescem ainda as restrições (igualdades) correspondentes à definição de um tabuleiro concreto.

Tendo isto em conta, complete a definição do ficheiro `sudoku.smt2` e resolva o problema para $N = 2$ com a matriz dada acima como exemplo.

Se quiser resolver o jogo com iferentes matrizes, faça uso dos comandos `(push)` e `(pop)`.

4 Cryptarithms

O Cryptarithms é um jogo que consiste numa equação matemática entre números desconhecidos, cujos dígitos são representados por letras. Cada letra deve representar um dígito diferente e o dígito inicial de um número com vários dígitos não deve ser zero.

Indique os dígitos a que correspondem as letras envolvidas em cada uma das equações abaixo indicadas, modelando o problema numa teoria de inteiros.

1. TWO + TWO = FOUR
2. SEND + MORE = MONEY

Temos duas sugestões (alternativas) para modelar o problema:

1. Escrever diretamente a equação, representado cada parcela por uma expressão aritmérica onde cada letra é multiplicada pelo seu “peso específico” (em base 10).
2. Escrever um conjunto de equações que simulem a soma dos dois números envolvidos, avançando da direita para a esquerda com o respectivo “carry”.

Crie ficheiros no formato SMT-LIBv2 que modelem estes quebra-cabeças usando a lógica QF_LIA (*quantifier-free linear integer arithmetic*) e use um SMT solver para os resolver.

5 Programas que manipulam arrays

Uma teoria muito útil para a verificação de programas é a teoria de arrays funcionais, com extensibilidade. O mais comum é utilizá-la no contexto de uma lógica com aritmética (linear) inteira (necessária para as operações sobre os índices) e funções não interpretadas (AUFLIA ou, de preferência, QF_AUFLIA). Mas é também possível a combinação da teoria de arrays com a teoria de bitvectors ou de reais.

Os arrays funcionais são descritos com base em duas funções de escrita e leitura, `store` e `select`. A atribuição de um valor v à posição i de um array a é representada por um novo array (`store a i v`) (daí o nome funcional). O conteúdo do array resultado é igual ao primeiro, excepto na posição i que passa a conter o valor v .

O ponto essencial a ter em conta para captar o comportamento de um programa imperativo é que uma atribuição como $a[i] = x$ terá de ser captado pela fórmula ($= a1$ (`store a0 i x`)). Ou seja, terão de ser utilizadas duas variáveis para o array, captando os estados anterior e posterior à atribuição, sendo o segundo dado por uma operação `store` sobre o primeiro.

Considere agora o programa sobre inteiros (sintaxe C):

```
x = a[i];
y = y + x;
a[i] = 5 + a[i];
a[i+1] = a[i-1] - 5;
```

Complete o ficheiro `arrays.smt2` por forma a estabelecer a validade das seguintes afirmações sobre o programa:

1. No final da execução, verifica-se a seguinte propriedade: $x + a[i-1] = a[i] + a[i+1]$.
2. No final da execução, a soma dos valores guardados em $a[i-1]$ e $a[i]$ é sempre positiva.
3. Se o valor inicial de y for inferior a 5, então no final da execução, o valor de $a[i]$ é superior ao de y .

Sugestão: comece por codificar o programa. Depois faça uso dos comandos (`push`) e (`pop`) para ir colocando as perguntas sobre as suas propriedades, e tire as suas conclusões. No caso da propriedade não se verificar, analise a resposta do SMT solver e, com base nela, indique um contra-exemplo.

6 Teoria de bitvectors: o problema das N-rainhas

Uma das teorias mais úteis para a verificação de programas é a teoria `FixedSizeBitVectors`, que descreve vectores de bits de um comprimento arbitrário (mas fixo, dado à partida). O interesse desta teoria é a modelação de números inteiros tal como eles são de facto representados em máquina, ao invés da teoria matemática de números inteiros. Em particular, a aritmética de bitvectors é modular, captando perfeitamente o *overflow* típico da aritmética implementada em computador.

Note-se que um tratamento possível para os vectores de bits é simplesmente codificar cada vector de n bits através de um conjunto de n variáveis proposicionais. Este tratamento é

conhecido por *bit-blasting*, e permite a utilização directa de um SAT solver, sem necessidade de qualquer procedimento de decisão para a teoria (as operações lógicas e aritméticas são descritas directamente por circuitos ao nível proposicional).

Vamos introduzir esta teoria num contexto diferente, o do problema das N rainhas. Recorde as restrições deste problema, relativo ao posicionamento de rainhas num tabuleiro de xadrez generalizado ($N \times N$):

- haverá no máximo uma rainha em cada linha, coluna, ou linha diagonal do tabuleiro;
- haverá pelo menos uma rainha em cada linha e em cada coluna do tabuleiro.

Vamos agora resolvê-lo com a ajuda de um SMT solver, recorrendo à teoria de vectores de bits (*bitvectors*). Utilizaremos a lógica QF_BV (*closed quantifier-free formulas over the theory of fixed-size bitvectors*), a mais simples contendo esta teoria. A ideia será representar cada tabuleiro por um conjunto de N vectores de N bits.

Para resolver o problema com $N = 4$ declaramos 4 constantes do tipo (`_ BitVec 4`), como se segue (`4queens.smt2`):

```
(set-logic QF_BV)

; The 4 rows are represented by 4 bitvectors of length 4
(declare-fun r1 () (_ BitVec 4))
(declare-fun r2 () (_ BitVec 4))
(declare-fun r3 () (_ BitVec 4))
(declare-fun r4 () (_ BitVec 4))
```

(`_ BitVec n`) é o tipo de bitvectors cujo comprimento é n . As constantes podem ser definidas usando notação binária, decimal ou hexadecimal. Nos casos de notação binária ou hexadecimais, o tamanho bitvector é inferido a partir do número de caracteres. Por exemplo, o numeral 10 pode ser representado por: `#b01010` – bitvector de tamanho 5 em formato binário; `#x00a` – bitvector de tamanho 12 em formato hexadecimal; ou (`_ bv10 32`) – bitvector de tamanho 32 em formato decimal.

O problema das N -rainhas pode ser codificado de forma compacta tirando partido de algumas operações sobre bitvectors disponíveis, nomeadamente:

```
(bvand #b110 #b011)      ; bitwise and
(bvxor #x6 #x3)         ; bitwise xor
(bvsub #b00000111 #b0000011) ; subtraction
(bvshl #x07 #x03)       ; shift left
(bvlshr #xf0 #x03)      ; unsigned (logical) shift right
```

Na codificação das restrições tenha em atenção o seguinte:

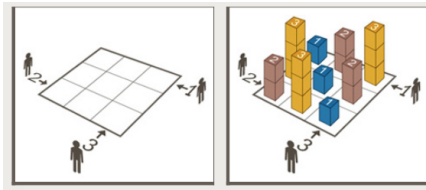
- podemos verificar se um bitvector r tem apenas um bit a 1, testando se a conjunção bitwise de r com $r-1$ retorna 0; isto pode ser útil para as restrições nas linhas;
- as restrições nas colunas podem ser feitas com o auxílio de um *xor*;
- para as restrições nas diagonais serão úteis as operações de shift.

Tendo em conta as explicações dadas acima, exprima as restrições necessárias para resolver o problema num tabuleiro 4×4 .

7 Skyscrapers puzzle

O Skyscrapers é um puzzle lógico que tem por objectivo organizar arranha-céus num tabuleiro ($N \times N$) de forma a que o seu horizonte seja visível de acordo com as pistas (números colocados nas bordas do tabuleiro que indicam quantos arranha-céus é possível ver daquela posição). Adicionalmente, exige-se que:

- Todos os arranha-céus têm altura entre 1 e N .
- Não podem existir arranha-céus da igual altura numa mesma coluna ou linha.
- O tabuleiro está inicialmente vazio



Tendo em conta as explicações dadas acima, exprima as restrições necessárias e resolva o problema para tabuleiros de dimensão 3×3 , seguindo as seguintes sugestões:

- Modele o problema na lógica QF_UFLIA (*quantifier-free linear integer arithmetic with uninterpreted sort and function symbols*).
- Defina uma função lógica que recebe três argumentos (uma fila de arranha-céus) a_1 , a_2 e a_3 e devolve o número de prédios visíveis quando olhamos assim: $\rightarrow a_1 a_2 a_3$

Lembre-se que pode usar expressões *ite* (*if-then-else*). Por exemplo, pode definir a função que calcula o máximo de dois inteiros, assim:

```
(define-fun maximo ((x Int) (y Int) Int)
  (ite (> x y) x y) )
```

- Depois de codificar as regras do puzzle, acrescente as restrições correspondentes à definição de um tabuleiro concreto (por exemplo, o da figura). Faça uso dos comandos (*push*) e (*pop*) para ir gerando soluções para vários tabuleiros.

8 Scheduling

Resolva o problema de *scheduling* apresentado nos slides com o auxílio de um SMT solver, usando a lógica que entender adequada.

Modele o problema relatado nos slides e faça uso dos comandos (*push*) e (*pop*) para ir colocando as seguintes questões:

- Podemos fazer todos os trabalhos com $\max = 10$?
- Ainda é possível fazer todos os trabalhos em menos de 10 unidades de tempo?
- Ainda é possível em 8 unidades de tempo?
- Ainda é possível em menos de 8 unidades de tempo?