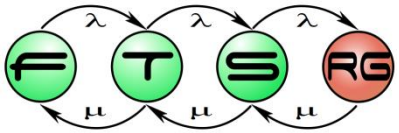
Szoftver-modellellenőrzés absztrakciós módszerekkel

Hajdu Ákos

hajdua@mit.bme.hu

2018.03.14.

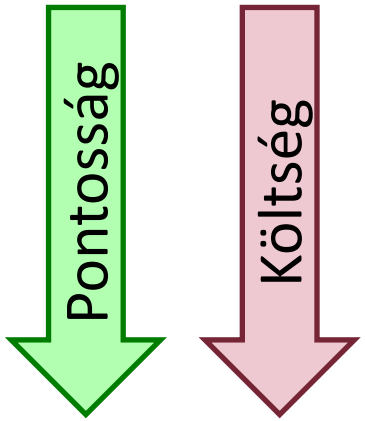


BEVEZETŐ

Bevezető

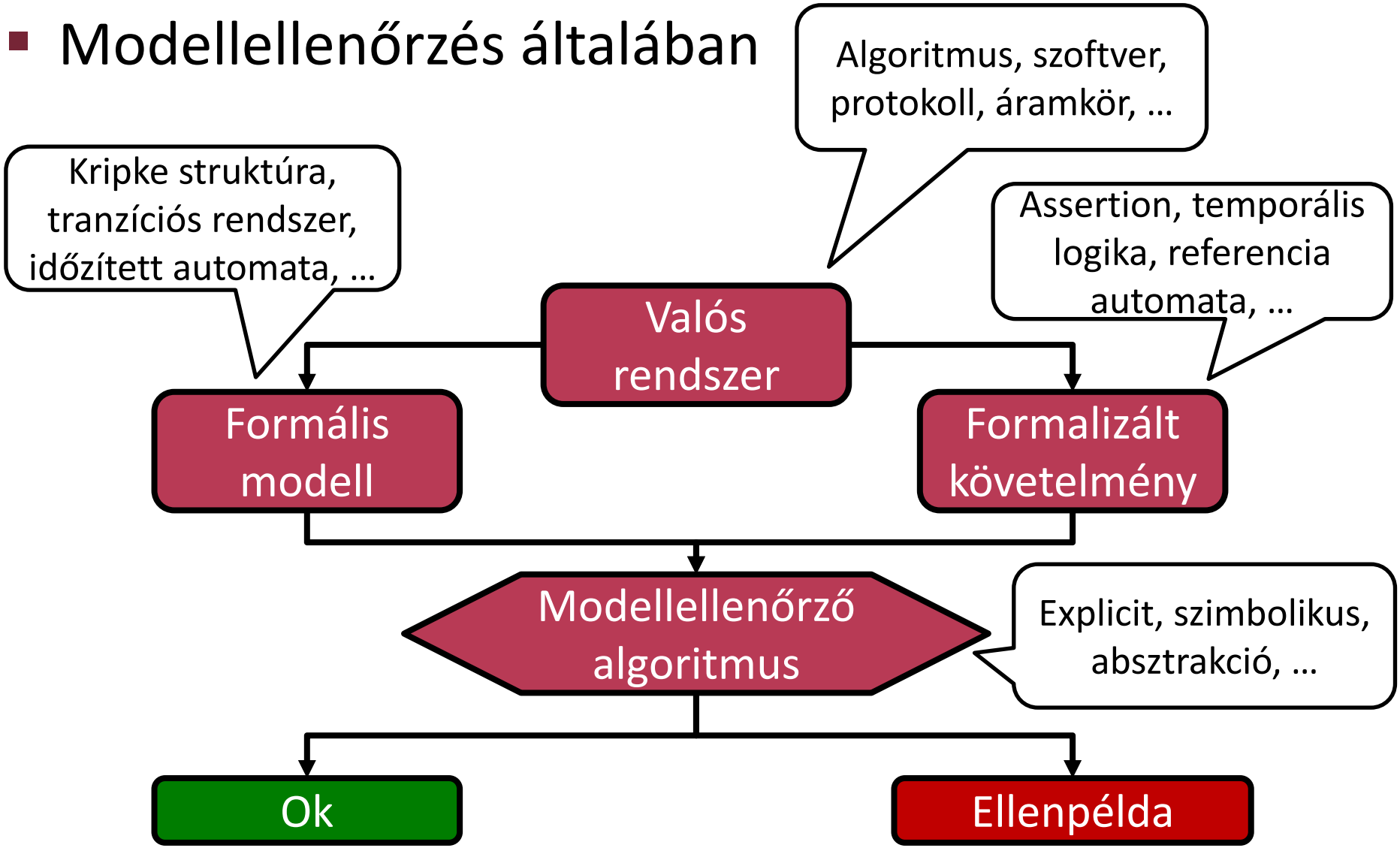
- Motiváció
  - Forráskód közvetlen ellenőrzése
  - „Gombnyomásra” működjön
    - Komoly háttérismeretek nélkül

- Jellegzetes szoftverellenőrzési technikák
  - Statikus analízis
    - Hibaminta kereső
    - Absztrakt interpretáció
  - Modellellenőrzés



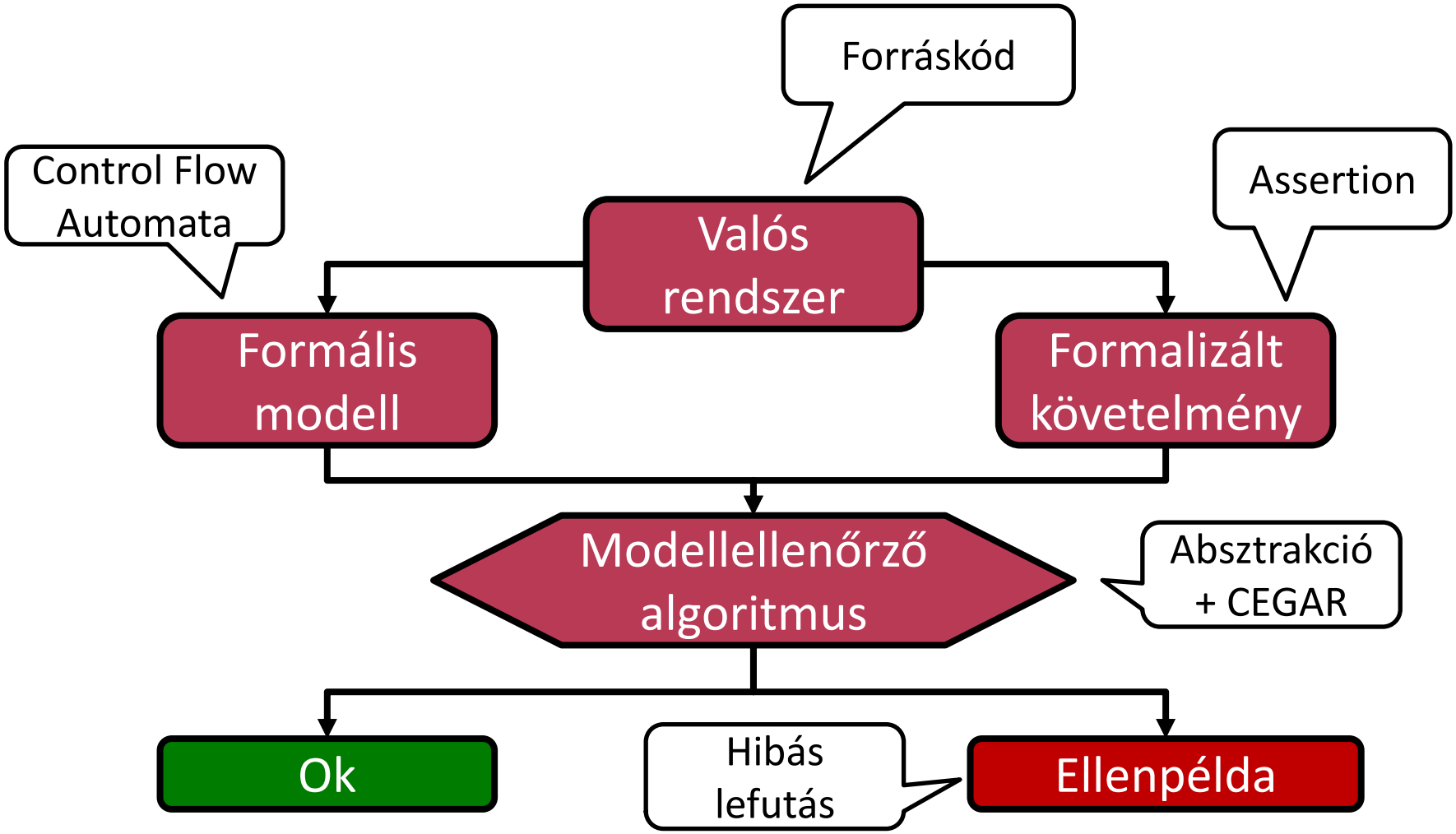
Bevezető – Modellellenőrzés

- Modellellenőrzés általában



Bevezető – Modellellenőrzés

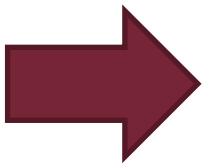
- Mai előadás: szoftver és absztrakció

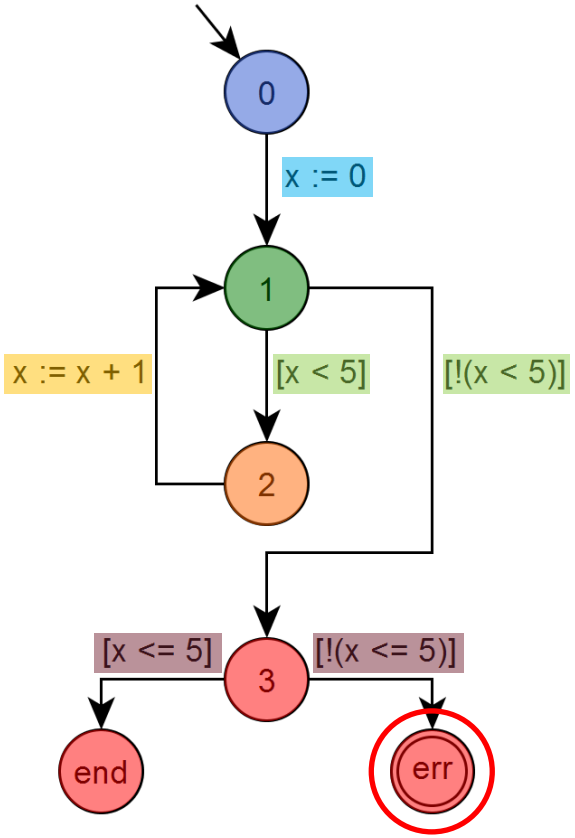


Bevezető – Modell és követelmény

- Control-Flow Automata (CFA)
  - Vezérlési helyek: L halmaz (l_0, l_1, …)
  - Élek (G halmaz), műveletekkel a változók felett
    - Pl. őrfeltétel, értékadás, …

```
    x : int
0:  x = 0
1:  while (x < 5) {
2:      x = x + 1
    }
3:  assert (x <= 5)
```

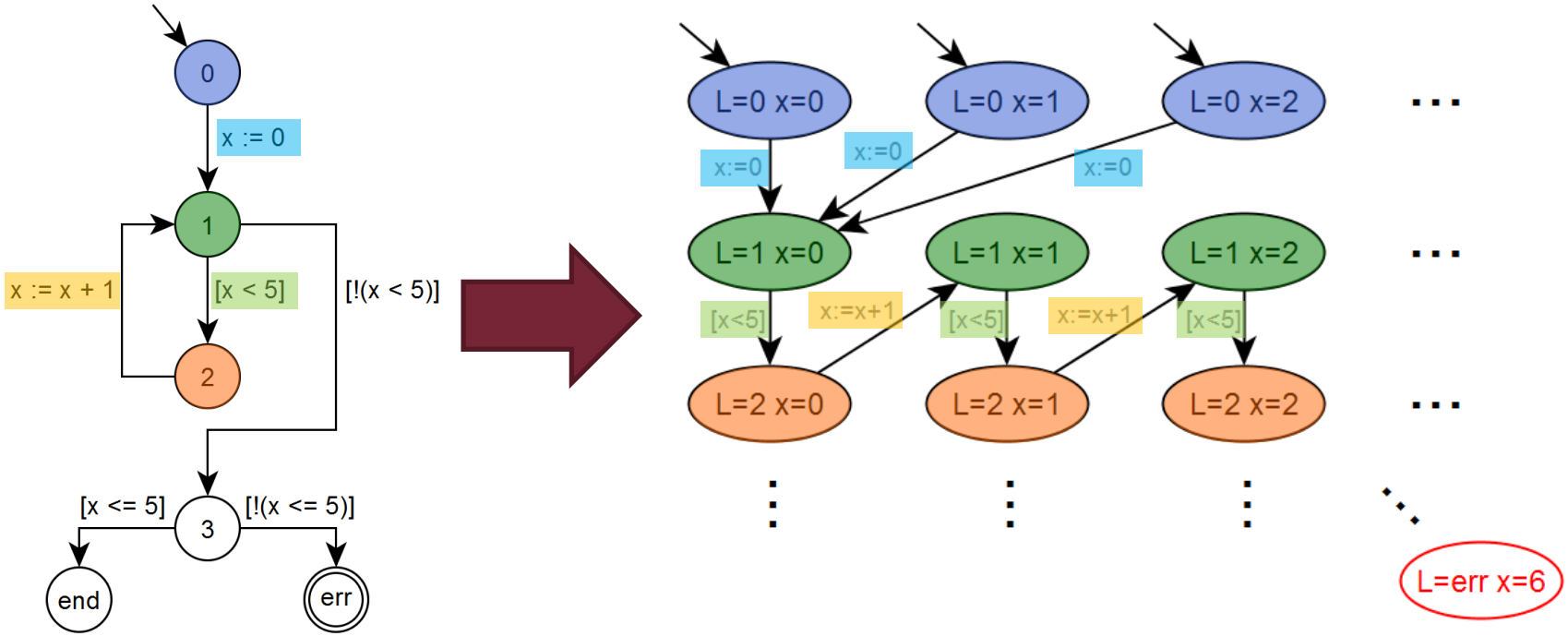




- Tipikus követelmény: „error” hely (jelölés: l_E) ne legyen elérhető

Bevezető – Állapotok és átmenetek

- Állapot: vezérlési hely + változók értékei ($L, x_1, x_2, \ldots, x_n$)
- Átmenet: műveletek
- Probléma: állapottér robbanás az adatváltozók miatt
  - Pl.: 10 vezérlési hely, 2 db 32 bites int → $10 \cdot 2^{32} \cdot 2^{32}$ lehetséges állapot
- Cél: állapottér reprezentáció méretének csökkentése absztrakcióval



Bevezető – Matematikai logika

- Propozicionális logika (nulladrendű)
  - Boolean változók és operátorok
  - SAT probléma: formula kielégíthető-e
    - Példa: korlátos modellellenőrzés
  - Kifejezőerő nem mindig elégséges

$$\neg p \wedge (p \vee q)$$

- Elsőrendű logika
  - Függvények, predikátumok, kvantorok
  - Általános esetben nem eldönthető

$$\forall x, y\ \exists z: p(f(x, y), g(z))$$

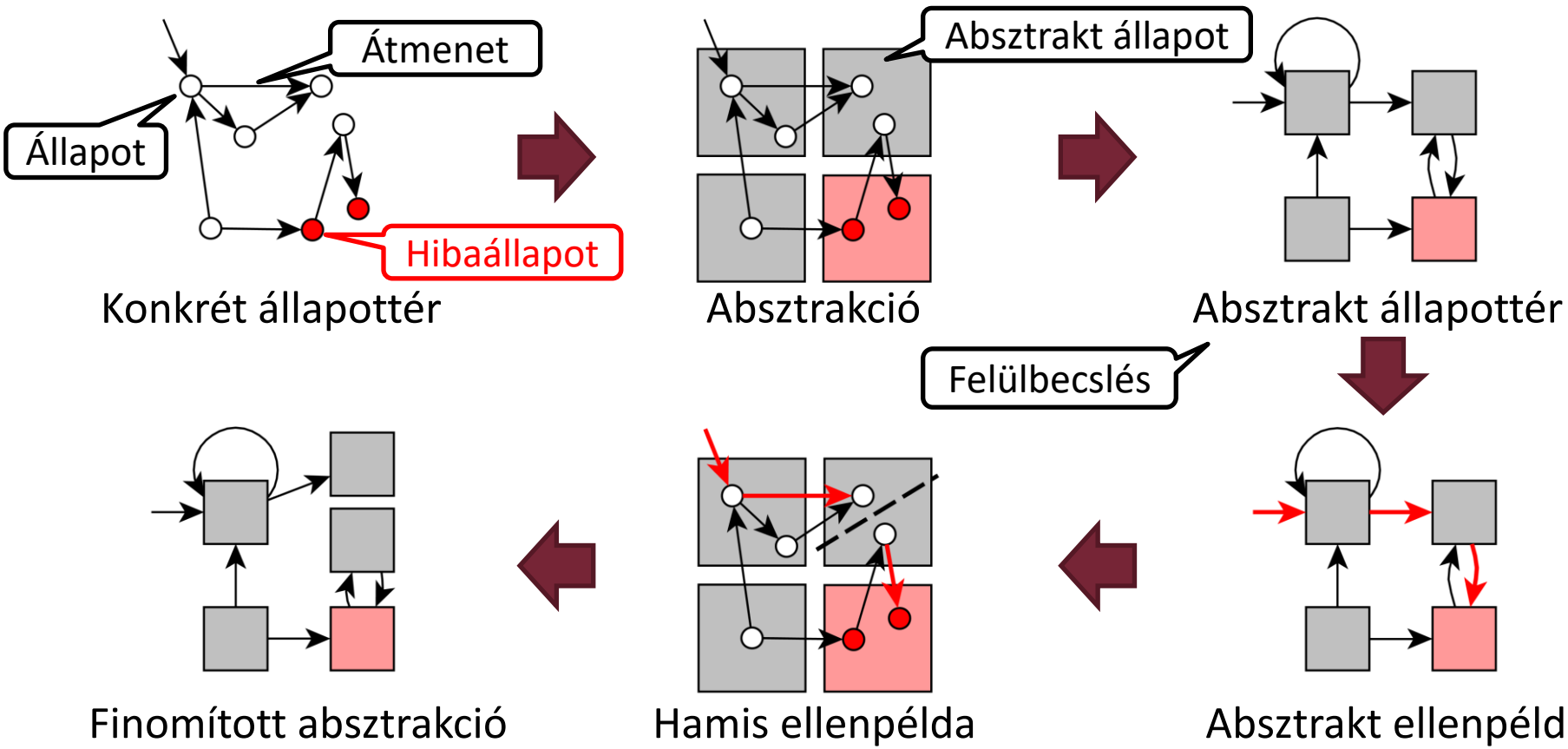
- Satisfiability Modulo Theories (SMT)
  - Elsőrendű logikai formulák
  - Interpretált szimbólumok
    - Pl. egész aritmetika

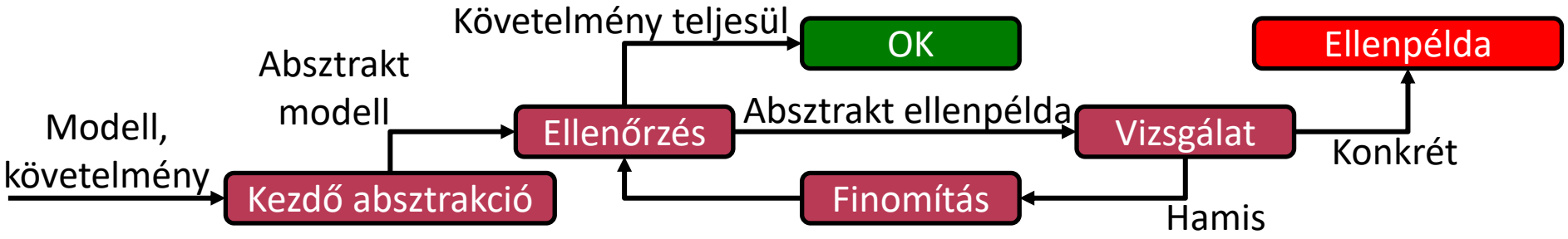
$$(x \leq y + 1) \wedge (y \geq 3)$$

COUNTEREXAMPLE-GUIDED ABSTRACTION REFINEMENT (CEGAR)

(Ellenpélda-alapú absztrakció finomítás)

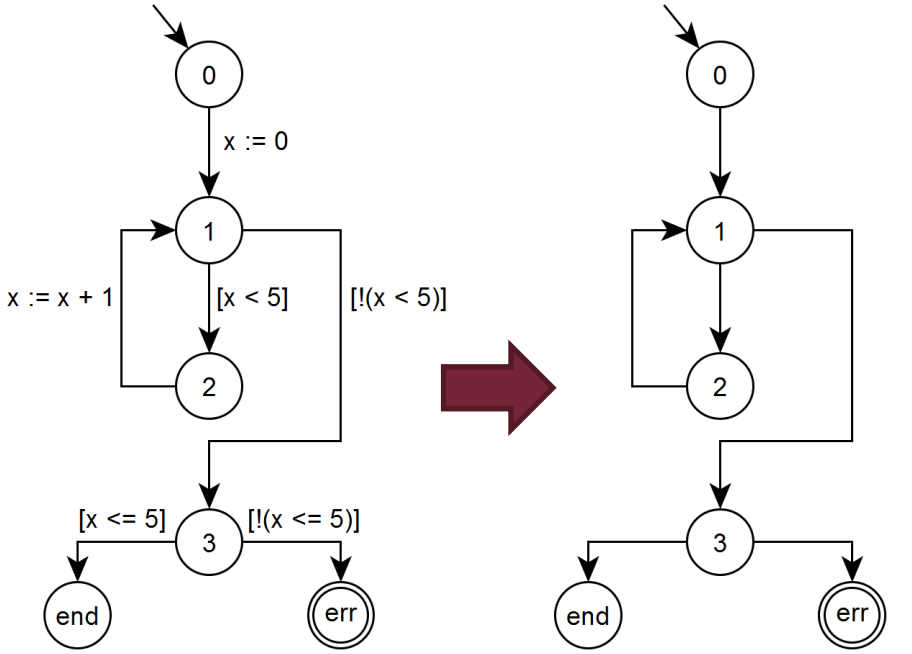
CEGAR – Bevezető áttekintés





Absztrakció – Bevezető

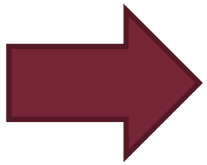
- Absztrakció
  - Általános matematikai eszköz
  - Cél: Részletek elrejtése
  - Eredmény: Könnyebb probléma
- Absztrakció példa
  - Vezérlési hely absztrakció
    - $(l, x_1, x_2, \ldots, x_n) \rightarrow (l)$
  - Önmagában általában nem célszerű
    - Triviálisan elérhető a hibaállapot
    - Kiegészítés predikátumabsztrakcióval



Predikátumabsztrakció

- Predikátumabsztrakció
  - Változók konkrét értékei helyett a változókon értelmezett predikátumok nyilvántartása
  - Absztrakt állapot: adott vezérlési helyhez tartozó konkrét állapotok, amelyekre ugyanazok a predikátumok teljesülnek
- Absztrakció kiszámítása: Első lehetőség
  - Konkrét állapotok összegyűjtése és összevonása
    - A konkrét állapotok összegyűjtése: Állapottér robbanás ☹
  - Példa: 3x3 konkrét állapot, 3 predikátum → 5 absztrakt állapot

Változók:
$x, y; D_x = D_y = \{0,1,2\}$
Predikátumok:
$(x = y), (x < y), (y = 2)$



y\x	0	1	2
0	$(x = y)$		
1	$(x < y)$	$(x = y)$	
2	$(x < y)$ $(y = 2)$	$(x < y)$ $(y = 2)$	$(x = y)$ $(y = 2)$

Predikátumabsztrakció

- Absztrakció kiszámítása: Másik módszer
  - Csak az absztrakt állapotok felsorolása: Mi lehetséges?
  - P predikátumhalmaz → $|L| \cdot 2^{|P|}$ lehetséges absztrakt állapot

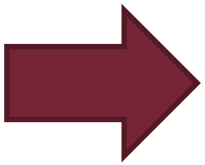
- Példa
  - 3 predikátum → 8 lehetséges absztrakt állapot vezérlési helyenként
  - Ténylegesen nem mind fordulhat elő
    - SMT megoldóval kiszűrhető
    - Pl. együtt nem fordulhat elő: $(x = y) \wedge (x < y) \wedge \neg(y = 2)$

	$x = y$	$x < y$	$y = 2$
1	X	X	X
2	X	X	✓
3	X	✓	X
4	X	✓	✓
5	✓	X	X
6	✓	X	✓
7	✓	✓	X
8	✓	✓	✓

Predikátumabsztrakció

- Absztrakt állapotok Boole változókkal
  - Konkrét / Absztrakt
  - $(l, x_1, \ldots, x_n) \rightarrow (l, b_1, \ldots, b_m)$
  - b_i Boole változó: i. predikátum teljesül vagy nem
  - Jelölés: $p(b_i) = \begin{cases} p_i & \text{ha } b_i \text{ igaz} \\ \neg p_i & \text{egyébként} \end{cases}$
- Példa

Változók:
$x, y; D_x = D_y = \{0,1,2\}$
Predikátumok:
$(x = y), (x < y), (y = 2)$



$l\ x\ y$

$(0,0,0) \rightarrow (0, T, F, F)$

$(6,1,2) \rightarrow (6, F, T, T)$

$l\ (x = y)(x < y)(y = 2)$

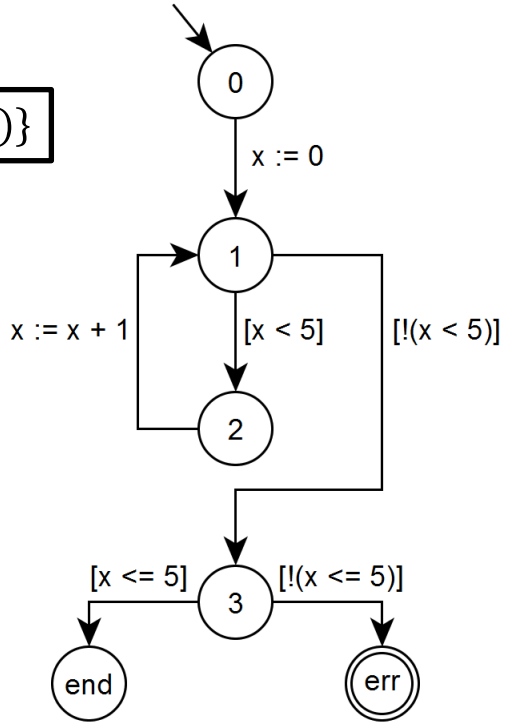
Predikátumabsztrakció

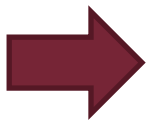
- Absztrakt kezdőállapot, hibaállapot
  - Absztrakt kezdőállapot: $(l, b_1, \ldots, b_m)$, ahol $l = l_0$
  - Absztrakt hibaállapot: $(l, b_1, \ldots, b_m)$, ahol $l = l_E$
- Absztrakt átmenetek
  - Absztrakt átmenet: Létezik, ha van legalább egy konkrét átmenet a tartalmazott konkrét állapotok között (azaz egzisztenciális tulajdonságú az absztrakció)
    - SMT megoldóval számítható (konkrét állapotok felsorolása nélkül)
    - $(l, b_1, \ldots, b_m)$ és $(l', b'_1, \ldots, b'_m)$ között létezik átmenet, ha:
      - $\exists op: (l, op, l') \in G$, azaz van op művelettel él a két hely között a CFA-ban, és
      - $p(b_1) \wedge \cdots \wedge p(b_m) \wedge op \wedge p(b'_1) \wedge \cdots \wedge p(b'_m)$ kielégíthető

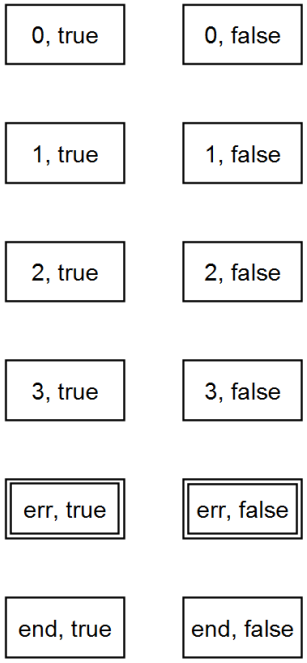
Predikátumabsztrakció

- Példa

$P = \{(x \leq 5)\}$





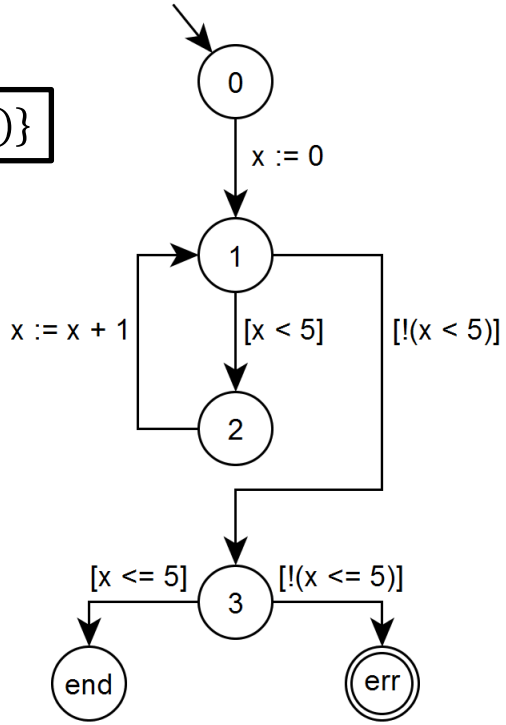


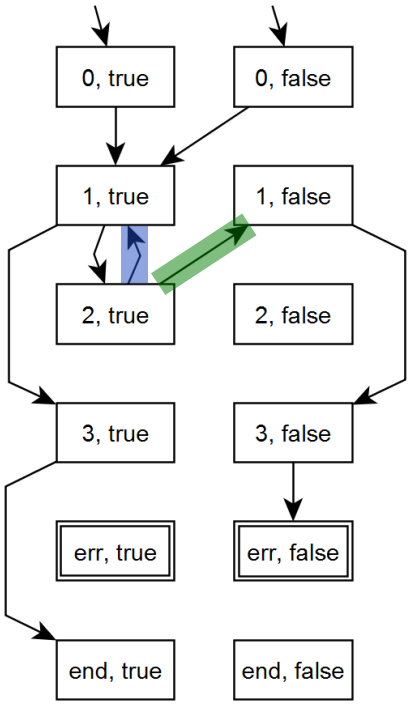
- 6 vezérlési hely, 1 predikátum→ $6 \cdot 2^1 = 12$ absztrakt állapot

Predikátumabsztrakció

- Példa

$P = \{(x \leq 5)\}$

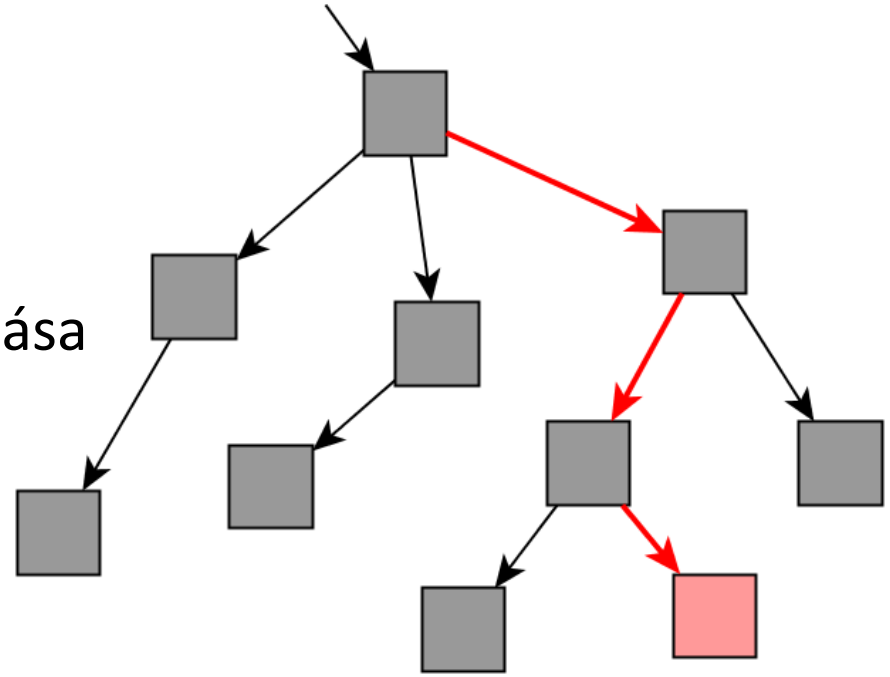




- Átmenet példák
  - $(2, \text{true}) \rightarrow (1, \text{true})$
    - $(2, x := x + 1, 1) \in G$ és $(x \leq 5) \wedge (x' = x + 1) \wedge (x' \leq 5)$ kielégíthető, pl. $x = 0, x' = 1$
  - $(2, \text{true}) \rightarrow (1, \text{false})$
    - $(2, x := x + 1, 1) \in G$ és $(x \leq 5) \wedge (x' = x + 1) \wedge \neg(x' \leq 5)$ kielégíthető, pl. $x = 5, x' = 6$

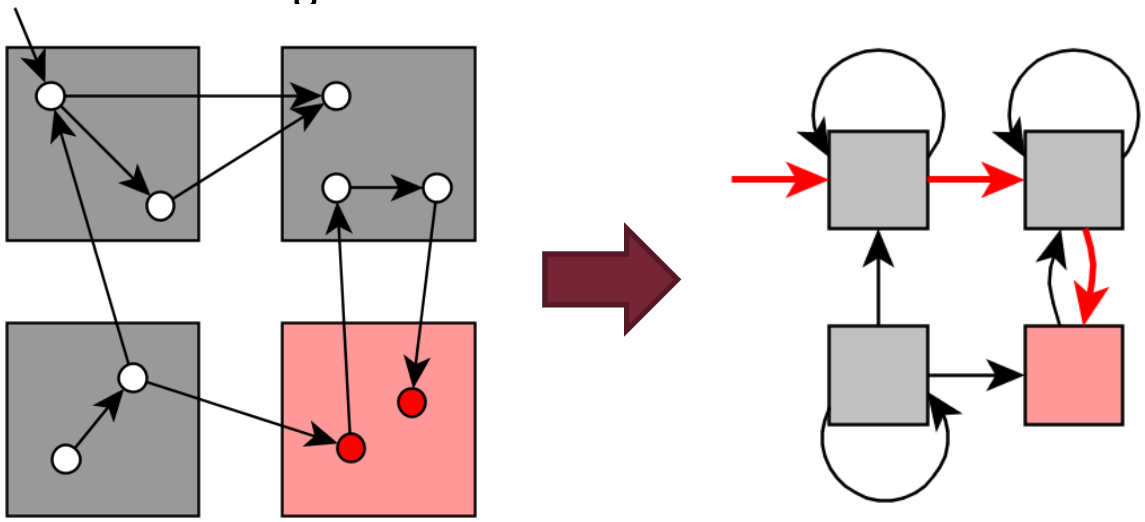
Modellellenőrzés

- Absztrakt állapottér bejárása
  - Valamilyen keresési stratégiával, pl. DFS, BFS
  - Hibaállapot keresése
- Optimalizációk
  - „On-the-fly”
    - Absztrakt állapotok kiszámítása keresés közben
  - Inkrementális
    - Absztrakció finomítás után a változatlan részeket nem kell újra bejárni



Modellellenőrzés

- Egzisztenciális absztrakció tulajdonságai
  - Felülbecsli az eredeti modell viselkedéseit
    - Minden konkrét útvonalhoz van megfelelő absztrakt útvonal
    - Ha nincs absztrakt útvonal a hibaállapothoz: nincs konkrét útvonal sem
    - Ha van absztrakt útvonal a hibaállapothoz: nem biztos, hogy van konkrét útvonal is
  - Tehát: Az absztrakt ellenpéldát ellenőrizni kell
    - Van-e ennek megfelelő konkrét útvonal?

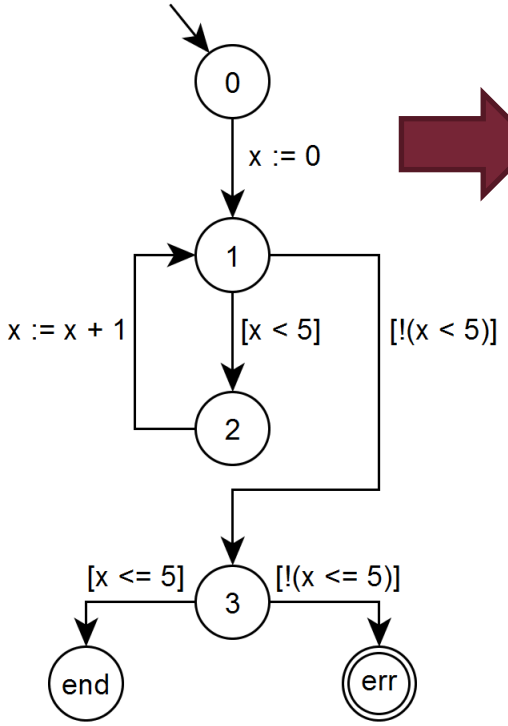


Absztrakt ellenpélda

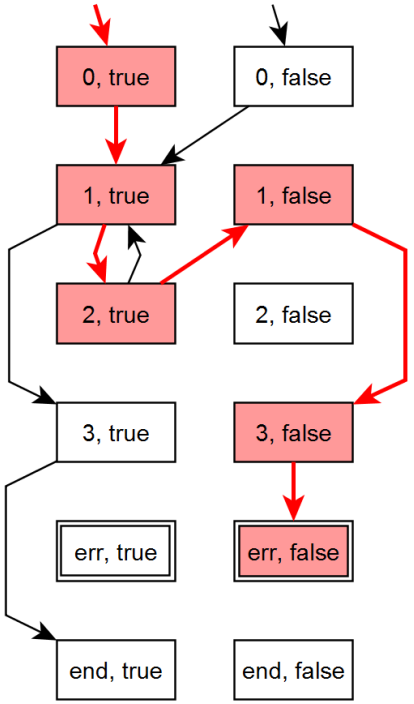
- Absztrakt ellenpélda alakja
  - Vezérlési helyek és predikátumok sorozata
  - $(l_1, b_{1,1}, \dots, b_{1,m}), (l_2, b_{2,1}, \dots, b_{2,m}), \dots, (l_n, b_{n,1}, \dots, b_{n,m})$
- Konkrét útvonal keresése: konkrét állapottér egy részének bejárása
  - Absztrakt ellenpélda által vezérelve (mit kell bejárni)
  - SMT megoldó segítségével
    - Korlátos modellellenőrzéshez hasonlóan
    - Predikátumabsztrakciónál egy átmenetre bemutatott módszer általánosítása n lépésre
- Ha létezik konkrét útvonal→ konkrét modell is hibás
- Ha nem létezik konkrét útvonal → hamis ellenpélda

Absztrakt ellenpélda

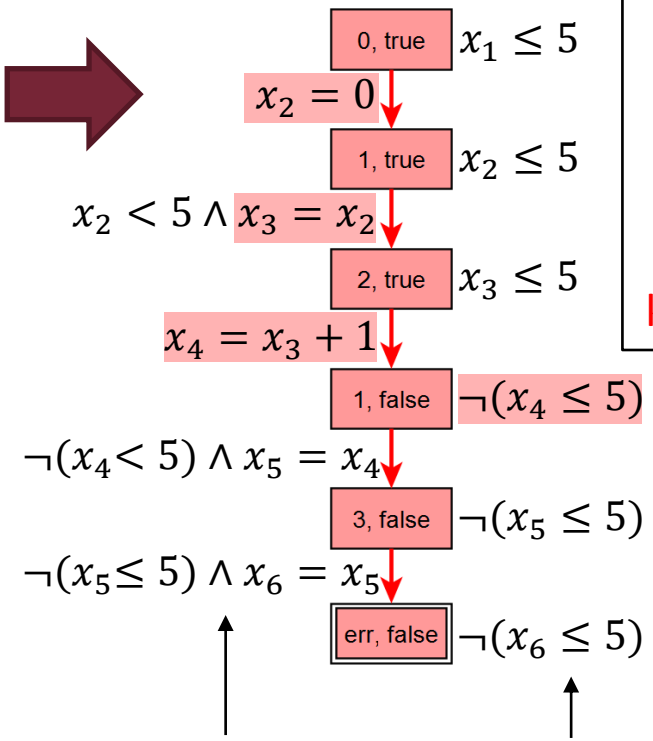
- Példa



$P = \{(x \leq 5)\}$



Absztrakt ellenpélda (6 állapot)



Műveletek az átmeneteken

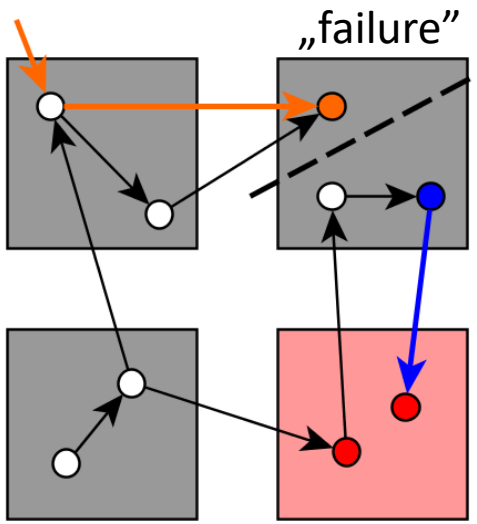
Állapotok predikátumai

$(x_1 = 3)$
$(x_2 = 0)$
$(x_3 = 0)$
$(x_4 = ?)$

Nem kielégíthető

Hamis ellenpélda

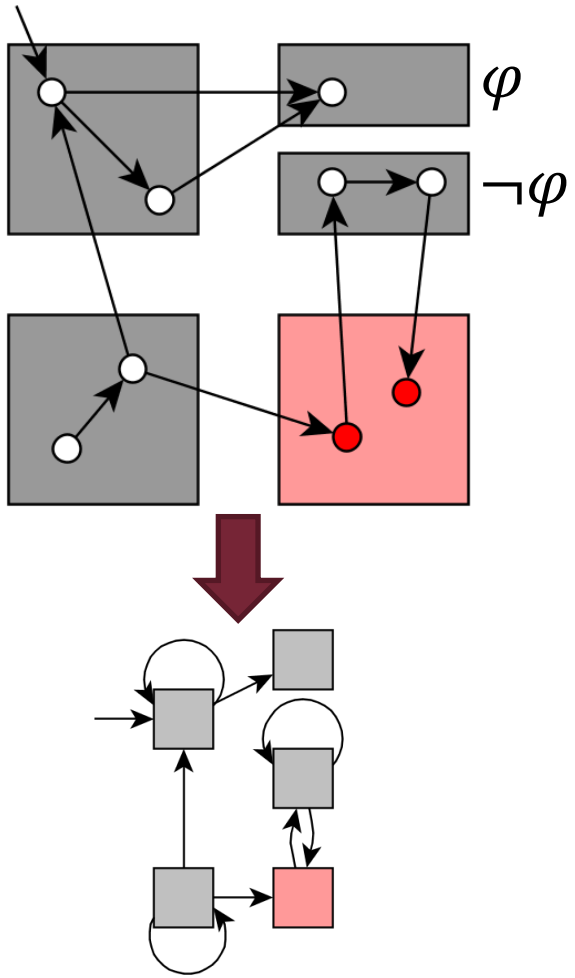
- „Failure” állapot: Eddig az állapotig van út és onnan tovább is, de ezek a konkrét modellben elkülönülő utak
- Konkrét állapotok csoportosítása a „failure” absztrakt állapotban
  - D = “Dead-end”: elérhető
  - B = “Bad”: következő állapotra lép
  - IR = “Irrelevant”: többi



- Hamis ellenpélda oka
  - Predikátumhalmaz nem különbözteti meg D-t és B-t

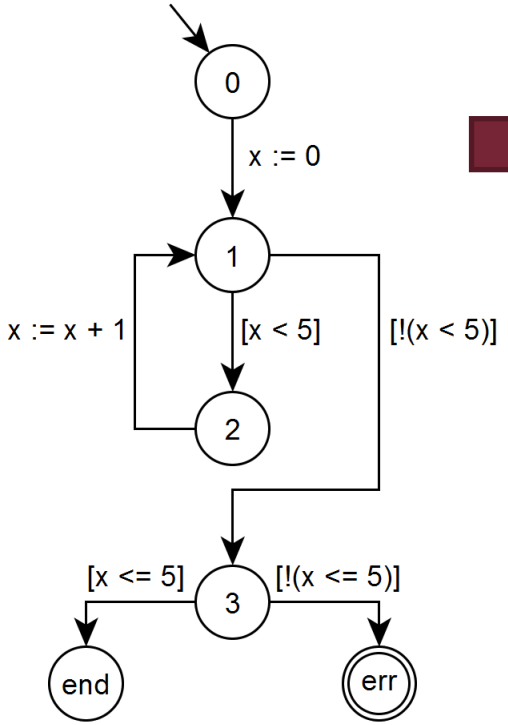
Absztrakciófinomítás

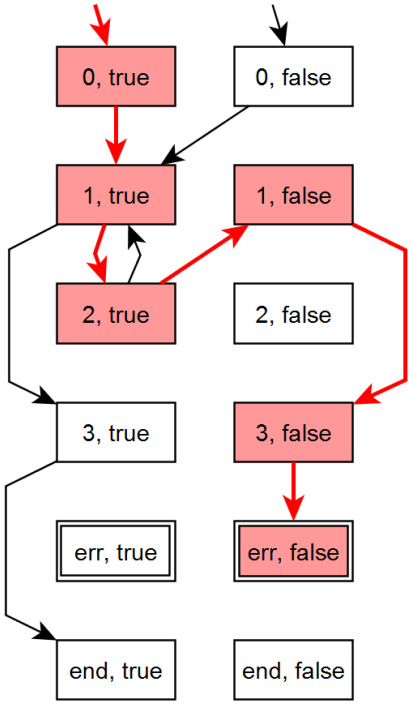
- Cél: hamis ellenpélda kiküszöbölése
  - Bővebb predikátumhalmaz (finomabb absztrakció)
  - D és B szétválasztása
    - Konkrét állapotok felsorolása nélkül kell
    - D és B leírása formulákkal
    - SMT megoldó képes egy φ formulát generálni, ami szétválasztja ezeket (egyiken igaz, a másikon nem), ez az ún. *interpoláció*
  - $P \cup \{\varphi\}$ predikátumhalmaz esetén ez a hamis ellenpélda megszűnik
    - Sőt, φ predikátumot elég csak a „failure” állapotban alkalmazni *(„lusta” absztrakció)*
- További hamis ellenpéldák
  - További finomítások, újabb predikátumok



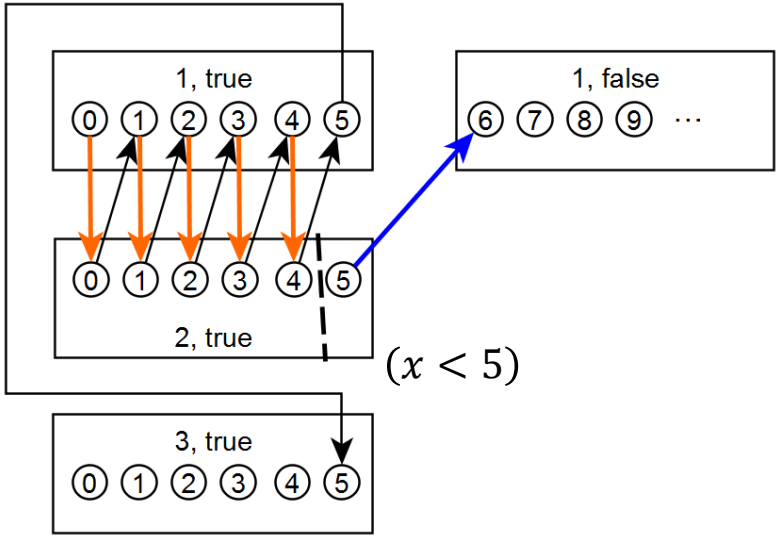
Absztrakciófinomítás

- Példa





$(x_1 = 3)$
$(x_2 = 0)$
$(x_3 = 0)$
$(x_4 = ?)$

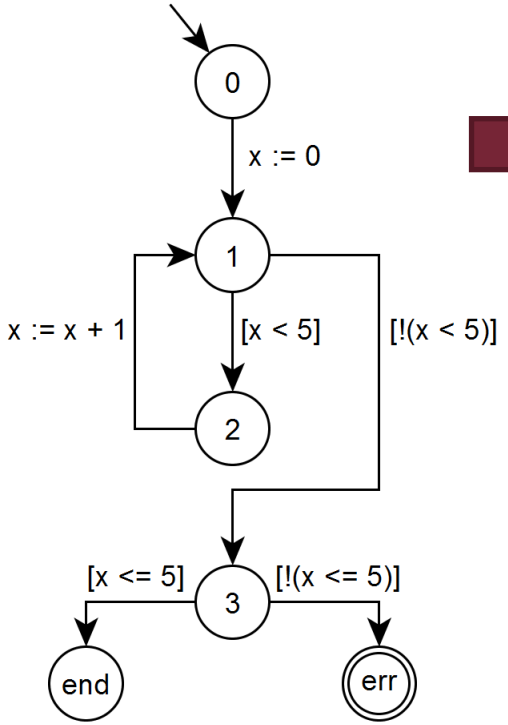


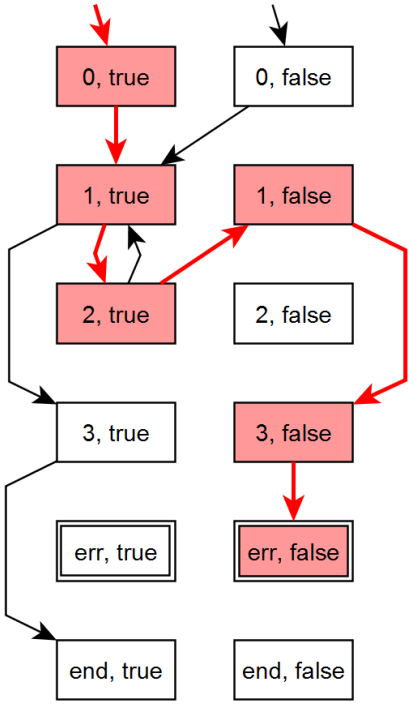
$P = \{(x \leq 5)\}$

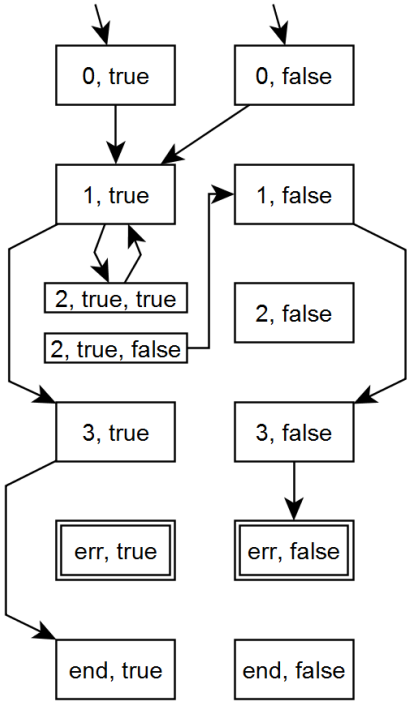
Szétválasztás: $(x < 5)$ predikátum

Absztrakciófinomítás

- Példa





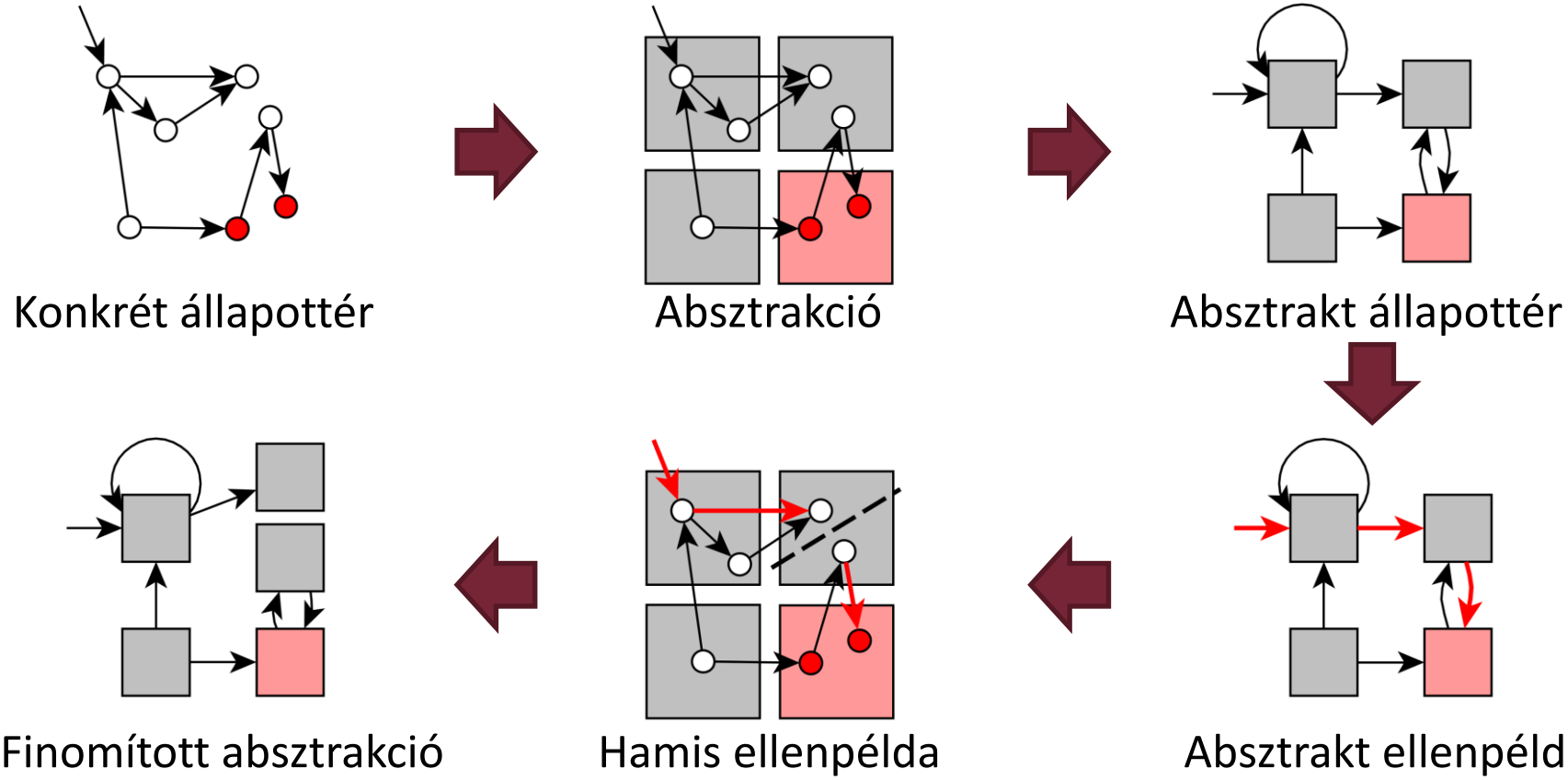


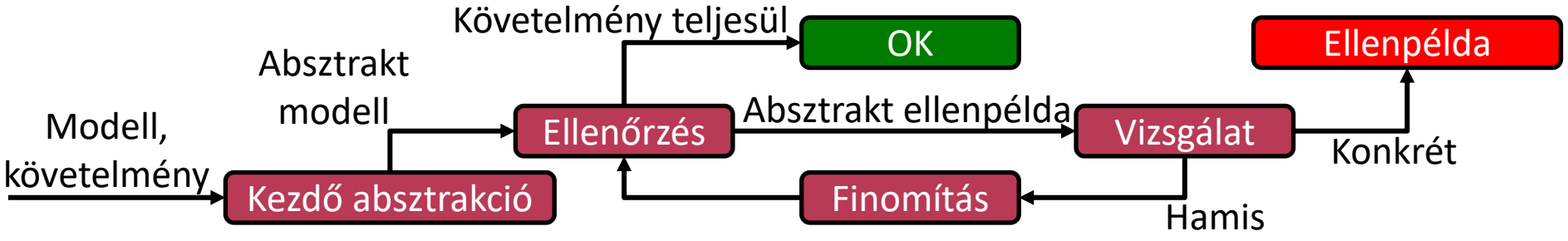
$P = \{(x \leq 5)\}$

$P = \{(x \leq 5), (x < 5)\}$

Szétválasztás: $(x < 5)$ predikátum

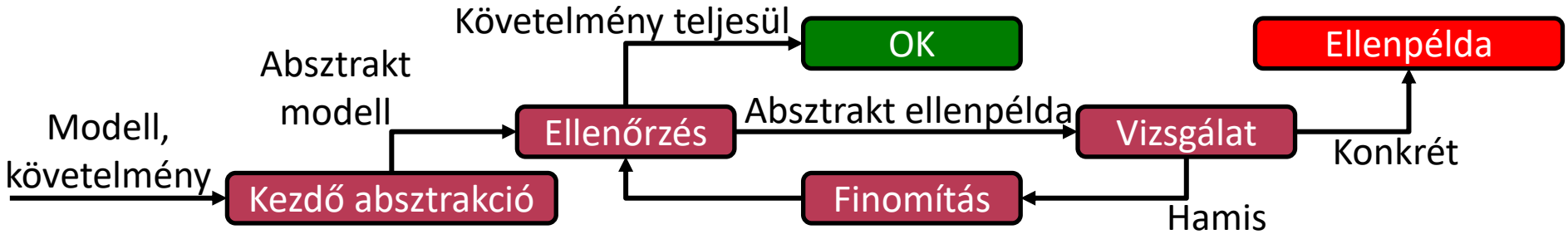
CEGAR – Összefoglaló





A CEGAR algoritmusról

- Counterexample-Guided Abstraction Refinement (CEGAR)
  - Automatikus módszer
    - Minden lépés automatikusan működik
    - Nem szükséges a formális módszerek részletes ismerete
  - Ki mondja meg a kezdeti predikátumhalmazt?
    - Lehet akár üres halmaz is (a CEGAR algoritmus fogja az absztrakt állapotokat szétválasztani)
    - Programban szereplő feltételes utasításokat alapján
    - Egyéb heurisztikák alapján



ESZKÖZÖK

Eszközök: SLAM2

- SLAM2
  - Static Driver Verifier Research Platform (SDVRP) része
  - Felépítése
    - Driver C kód: vizsgált komponens
    - Platform modell: környezet leírása
    - Ellenőrzés: API használati szabályok betartása
  - Működése
    - Boole program előállítása predikátumabsztrakcióval
    - Szimbolikus modellellenőrzés: BEBOP eszköz
    - CEGAR ciklus
  - research.microsoft.com/en-us/projects/slam/

Eszközök: BLAST

- BLAST
  - Berkeley Lazy Abstraction Software Verification Tool
  - Bemenet: C program + követelmény (BLAST Query Language)
  - Predikátumabsztrakció
    - Absztrakt elérhetőségi fa építése
  - Finomítás: új predikátum(ok) interpolációval
    - „Lusta” absztrakció: új predikátum alkalmazása lokálisan
  - Korlátok: szorzás, bitműveletek, túlcsordulás
  - mtc.epfl.ch/software-tools/blast/index-epfl.php

Eszközök: CPAchecker

- CPAchecker
  - The Configurable Software-Verification Platform
  - Bemenet: C program + specifikáció
    - Ellenőrzések: Assertion, error címke, deadlock, null dereference, …
  - Nagymértékben konfigurálható
    - Többféle absztrakció (nem csak predikátumok)
    - Absztrakt ellenpélda több prefixét tekinti
      - Többféle lehetséges finomítás közül választ (finomítási stratégia)
  - cpachecker.sosy-lab.org/

Eszközök: Theta

- Theta
  - Általános, moduláris, konfigurálható verifikációs keretrendszer
  - BME MIT saját fejlesztés
  - Általános: különböző formális modellek támogatása
    - Tranzíciós rendszer, control flow automata, időzített automata
  - Moduláris: újrafelhasználható, kombinálható modulok
    - Absztrakciók, finomítások, interpoláció, …
  - Konfigurálható: különböző algoritmusok és stratégiák
  - github.com/FTSRG/theta

Eszközök: SV-COMP verseny

- Competition on Software Verification 2017 (SV-COMP)
  - sv-comp.sosy-lab.org/2017/
  - 32 eszköz, 8908 verifikációs feladat (program + követelmény)
  - Program kategóriák
    - Arrays (ArraysReach, ArraysMemSafety)
    - Bit Vectors (BitVectorsReach, Overflows)
    - Heap Data Structures (HeapReach, HeapMemSafety)
    - Floats
    - Integers and Control Flow (ControlFlow, Simple, ECA, Loops, Recursive, ProductLines, Sequentialized)
    - Termination
    - Concurrency
    - Software Systems (DeviceDriversLinux64, BusyBox)
  - Adott kategóriához megtalálható a hatékony eszköz

ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalás

- Szoftver-modellellenőrzés
  - „Gombnyomásos” módszer
    - Kezelendő probléma: állapottér robbanás (a változók miatt)
  - Megoldás: absztrakció
    - Vezérlési hely + predikátumok a változókon
    - Egzisztenciális absztrakció (hamis ellenpélda lehet)
  - CEGAR: megfelelő absztrakció automatikus előállítása
    1. Kezdő absztrakt modell
    2. Modellellenőrzés
    3. Ellenpélda vizsgálata
    4. Absztrakció finomítása
  - Eszközök