

Hatékony technikák modellellenőrzéshez: Korlátos modellellenőrzés

dr. Majzik István

BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

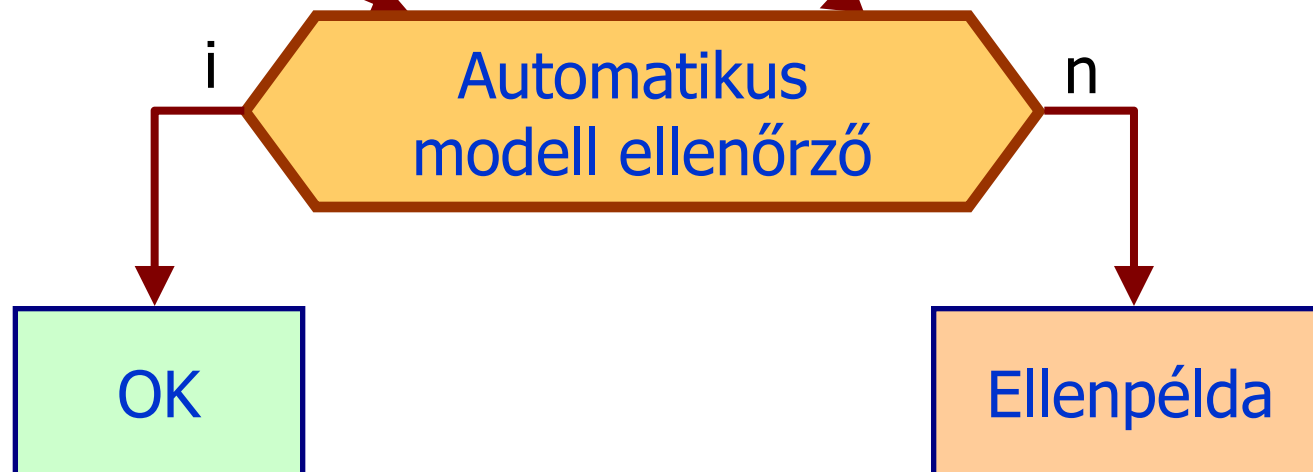
Motiváció: Mit szeretnénk elérni?

- Alacsony szintű formalizmusok (KS, LTS, KTS)
- Magasabb szintű formalizmusok

Temporális logikák:
PLTL, CTL, CTL*

Rendszer modellje

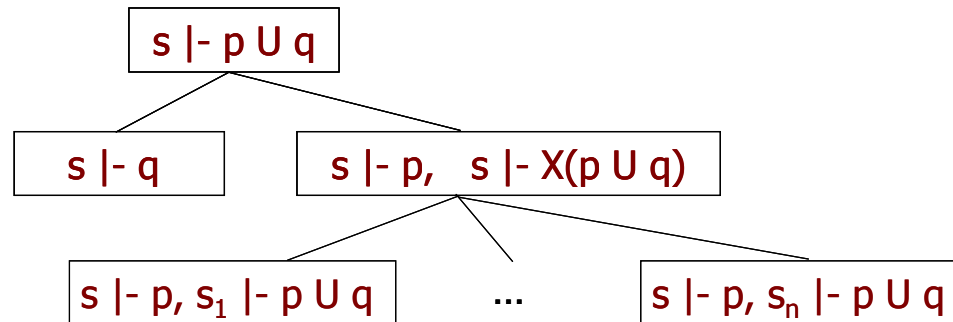
Követelmény megadása



Ismétlés: A modellellenőrzés tanult technikái

- PLTL modellellenőrzés:

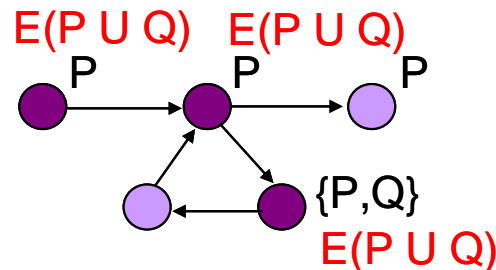
- Tabló módszer: Kifejezések felbontása a modell mentén



- Automata alapú megközelítés (kiegészítő anyag)

- CTL modellellenőrzés:

- Szemantika alapú módszer: Állapotok iteratív címkézése



A tárgyalt technikák áttekintése

- CTL modellellenőrzés: Szimbolikus technika

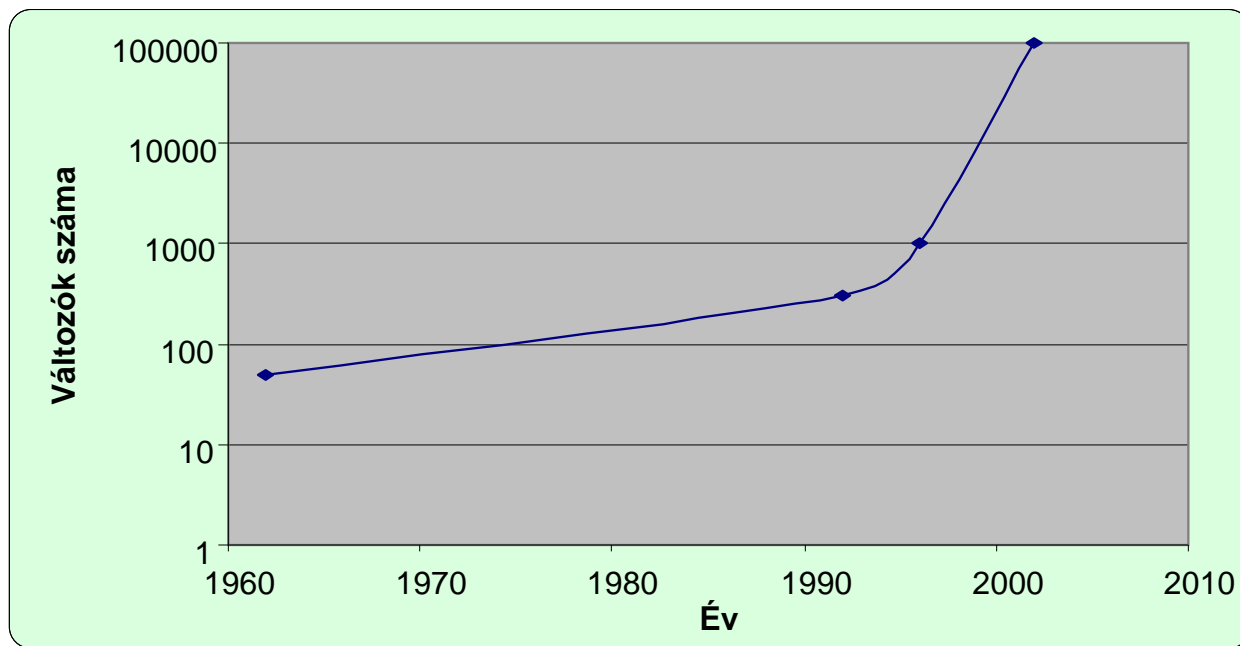
Szemantika alapú technika	Szimbolikus technika
Címkézett állapothalmazok	Karakterisztikus függvények (Boole logikai függvények): ROBDD reprezentáció
Műveletek állapothalmazokon	Hatékony műveletek ROBDD-ken

- Invariánsok modellellenőrzése: Korlátos modellellenőrzés
 - Logikai függvények igazságának keresése SAT megoldóval
 - Adott mélységig folytatható modellellenőrzés: Korlátos hosszúságú ellenpéldák keresése
 - Egy megtalált ellenpélda mindenképpen érvényes ellenpélda
 - Ha nincs ellenpélda, az nem végleges eredmény

Korlátos modellellenőrzés (Bounded Model Checking)

Felhasználható eredmény: SAT megoldók

- SAT megoldó:
 - Adott logikai függvényhez olyan változó-értékeket (változó-behelyettesítést) keres, amelyekkel a függvény értéke igaz
 - Példa: $f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \wedge x_2 \wedge \neg x_3$ függvény esetén $(1, 1, 0)$ bitvektor
- NP-teljes probléma, de hatékony algoritmusok vannak
 - zChaff, MiniSAT, ...



Célkitűzés

- A probléma alkalmas leképezése logikai függvényre
 - Modell és temporális logikai követelmény együttesen
 - Tipikusan invariáns követelmény ellenőrzésére:
Minden állapotra előírt tulajdonság
- SAT megoldó használata modellellenőrzésre
 - Ha a követelmény teljesül, a SAT megoldó nem talál behelyettesítést a függvényhez
 - Ha a követelmény nem teljesül, a SAT megoldó által adott behelyettesítés lesz egy ellenpélda
 - Az ellenpélda használható a hibakereséshez
 - Invariáns tulajdonságok esetén jól használható módszer

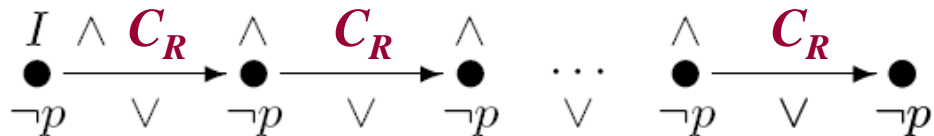
A korlátos modellellenőrzés alapja

- Az állapotteret nem „egyben” kezeljük
- Az útvonalak hosszát korlátozva végezzük az ellenőrzést
 - Állapottér bejárás egyszerre csak adott útvonalhossz korlátig történik: részleges ellenőrzés
 - Az útvonalhossz iteratívan növelhető
 - Egyes esetekben van „átmérője” az állapottérnek: a leghosszabb útvonal, ami bejárható
- A korlát becslése:
 - Intuíció a probléma méretéről
 - Worst case végrehajtási idő alapján

Informális bevezetés

- Hogyan képezzük az állapotteret?
 - Kiindulás a kezdőállapotból: $I(s)$ karakterisztikus függvénnyel megadható
 - „Kihajtogatás”: Lehetséges továbblépések az állapotátmeneti reláció mentén
 - Állapotátmeneti reláció (hová léphetünk tovább): $C_R(s,s')$ karakterisztikus függvénnyel
 - Ha s -ben vagyunk, $C_R(s,s')$ alkalmazása adja meg a lehetséges s' rákövetkezőket, majd s' esetén $C_R(s',s'')$ alkalmazása adja meg a lehetséges s'' rákövetkezőket ...
 - Egyszerűbb jelölés: Vesszők használata helyett felső index: $C_R(s^0,s^1)$ majd $C_R(s^1,s^2)$...
- Hogyan adjuk meg a követelményt?
 - Invariáns: Minden állapotra előírt kritérium: általánosan egy $p(s)$ predikátum
- Az ellenpéldát kijelölő logikai függvény részei (konjunkcióval) :
 - Kezdőállapotból indulunk: $I(s)$
 - „Lépegetünk” (kihajtogatunk) az állapotátmeneti reláció mentén: $C_R(s,s')$
 - Ellenpélda (valahol $p(s)$ nem teljesül): $\neg p(s)$ diszjunkció a bejárt állapotokra

Ezt a függvényt igazgá tevő behelyettesítés adja az ellenpéldát!



Jelölések

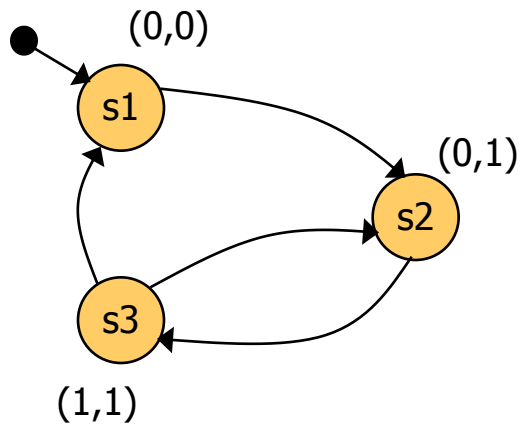
- $M=(S,R,L)$ Kripke-struktúra
- Logikai függvények:
 - $I(s)$: kezdőállapotok n változós karakterisztikus függvénye
 - Háttér: Állapotok „kódolása” n hosszú bitvektorokkal
 - $C_R(s,s')$: állapotátmenetek $2n$ változós karakterisztikus függvénye
 - Minden átmenet karakterisztikus függvénye \vee operátorral összefogva
 - $path()$: k hosszú útvonalak $(k+1)n$ változós karakt. függvénye

$$path(s^0, s^1, \dots, s^k) = \bigwedge_{0 \leq i < k} C_R(s^i, s^{i+1})$$

Vesszős változók helyett felső index

- $p(s)$: címkézett állapotok halmazának karakterisztikus függvénye
 - Atomi kijelentésekre pl. $P(s)$, $Q(s)$: Az L címkézés határozza meg
 - Általánosan: Állapotváltozók alapján konstruálható

Példa: A modell leképzése logikai függvénybe

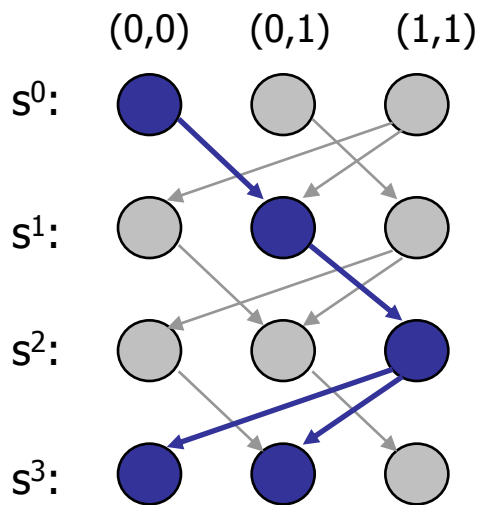


Kezdőállapot predikátum:

$$I(x,y) = (\neg x \wedge \neg y)$$

Állapotátmeneti reláció:

$$\begin{aligned}
 C_R(x,y,x',y') = & (\neg x \wedge \neg y \wedge \neg x' \wedge y') \vee \\
 & \vee (\neg x \wedge y \wedge x' \wedge y') \vee \\
 & \vee (x \wedge y \wedge \neg x' \wedge y') \vee \\
 & \vee (x \wedge y \wedge \neg x' \wedge \neg y')
 \end{aligned}$$



3 lépéses kihajtogatás a kezdőállapotból:

$$\begin{aligned}
 I(x^0,y^0) \wedge \text{path}(s^0,s^1,s^2,s^3) = & \\
 = & I(x^0,y^0) \wedge \\
 & C_R(x^0,y^0, x^1,y^1) \wedge \\
 & C_R(x^1,y^1, x^2,y^2) \wedge \\
 & C_R(x^2,y^2, x^3,y^3)
 \end{aligned}$$

A probléma formalizálása

- Bizonyítandó $p(s)$ invariáns: Minden útvonal, ami a kezdőállapotból indul, olyan állapotokba jut, ahol $p(s)$ igaz

$$\forall i: \forall s^0, s^1, \dots, s^i : (I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \Rightarrow p(s^i))$$

- Ha $p(s)$ nem igaz valahol, akkor lesz olyan i , amire a következő függvény igaz értéket vesz fel:

$$I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$$

A fv. igaz értékéhez tartozó behelyettesítést adja a SAT megoldó!

- Azaz az (s^0, s^1, \dots, s^i) útvonalat meghatározó $(i+1)n$ változó értéket
- Első ötlet: $i=0,1,2,\dots$ -ra rendre megvizsgálni, hogy i hosszú útvonalon igaz lehet-e a következő függvény (ha igaz, akkor van ellenpélda):

$$I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$$

Az algoritmus elemei

- Iteráció: $i=0,1,2,\dots$ az útvonalak hosszára
- Ciklusmentes utakat vizsgálunk: lfpath

Kifejtendő az állapotváltozókkal

$$\text{lfpath}(s^0, s^1, \dots, s^k) = \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^k) \wedge \bigwedge_{0 \leq i < j \leq k} s^i \neq s^j$$

- Megállási feltétel az iteráció során:
 - Nincs i hosszú ciklusmentes út kezdőállapotból, azaz nem lehet igaz

$$I(s^0) \wedge \text{lfpath}(s^0, s^1, \dots, s^i)$$

- „Rossz” állapothoz (ahol $p(s)$ nem igaz) nem is vezethet i hosszú ciklusmentes út (kezdőállapottól függetlenül), azaz nem lehet igaz

$$\text{lfpath}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$$

- Ha megáll az iteráció, akkor $p(s)$ mindenütt igaz

Az algoritmus

$i = 0$

while True do

if not SAT($I(s^0) \wedge \text{lfpath}(s^0, s^1, \dots, s^i)$)

or not SAT($(\text{lfpath}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i))$)

then return True

if SAT($I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg p(s^i)$)

then return (s^0, s^1, \dots, s^i)

$i = i + 1$

end

Nincs már i hosszú ciklusmentes út kezdőállapotból

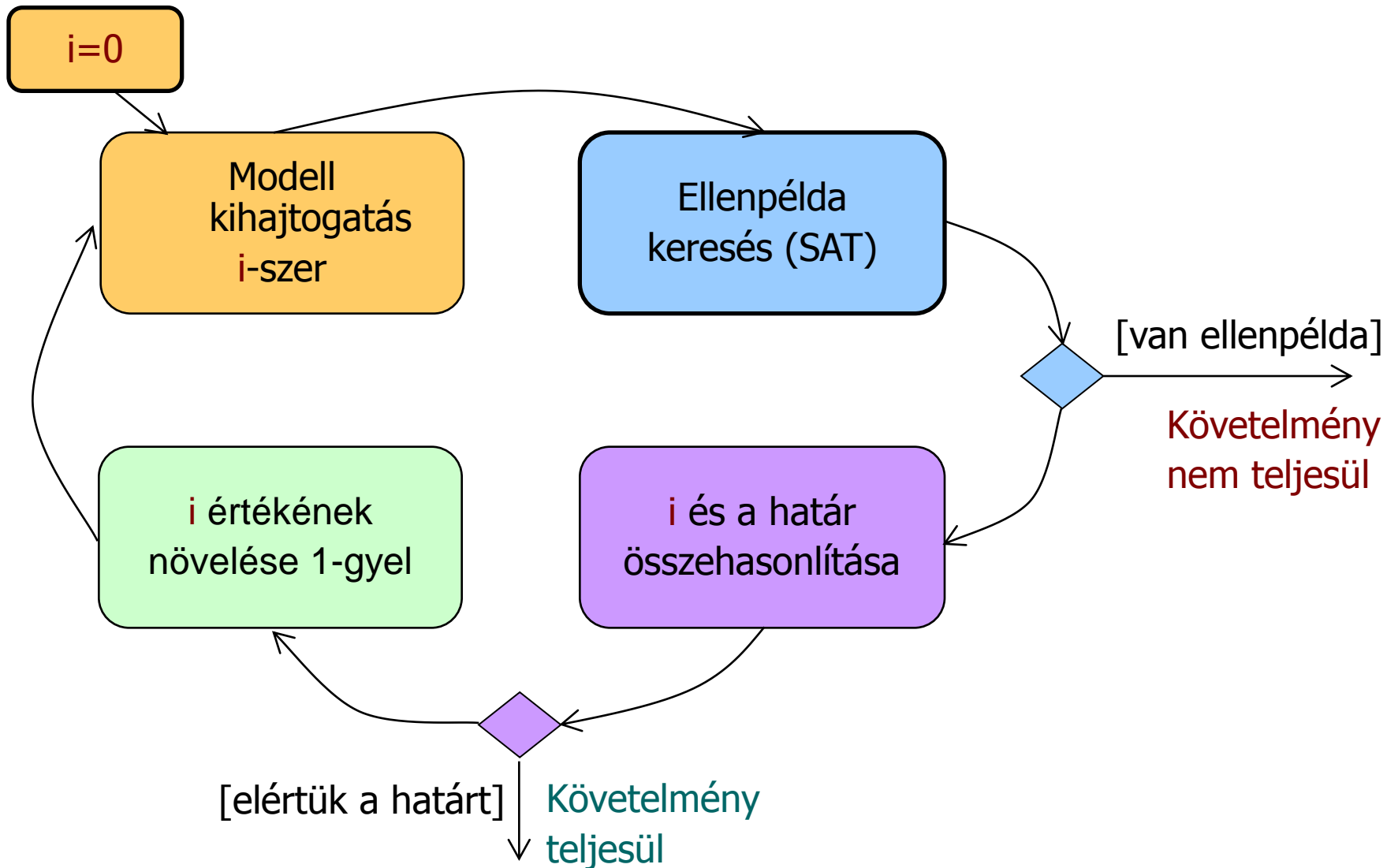
Nincs i hosszú ciklusmentes út „rossz” állapotra

Van i hosszú út kezdőállapotból „rossz” állapotba

Iteráció

- Ha az eredmény True: Az invariáns igaz.
- Ha az eredmény egy (s^0, s^1, \dots, s^i) útvonalat meghatározó $(i+1)n$ bitérték: ez lesz az ellenpélda olyan állapot eléréséhez, ahol $p(s)$ nem igaz

Korlátos modellellenőrzés iterációival



Az algoritmus finomítása

- Az iterálást nem 0-ról kezdjük
 - Adott k hosszú útvonallal kezdjük, és erre először az ellenpéldát próbáljuk meg generálni:
 - Ha van ilyen ellenpélda, akkor azt gyorsan megtaláljuk (iteráció nélkül)!
 - Ezután vizsgáljuk, hogy $k+1$ -re terminál-e az iteráció, majd növeljük az útvonal hosszát
- Nem garantált, hogy az eredményül kapott ellenpélda (útvonal) minimális hosszúságú
 - Nem 0-ról kezdtük az iterációt; ha k nagy, akkor „túllövünk a célon”
 - Itt k értékére heurisztika kell, ha rövid útvonalra törekszünk
- További megkötések a SAT megoldó bemenetére:
 - Az előre haladó útvonalakon ne legyenek kezdőállapotok (ez nem ciklust jelent, hiszen akár több kezdőállapot is lehet)
 - A visszafelé haladó útvonalakon ne legyenek olyan köztes állapotok, ahol $p(s)$ nem igaz

A finomított algoritmus

$i = k$

Kezdő érték

Van i hosszú útvonal kezdőállapotból „rossz” állapoton át

while True do

if $\text{SAT}(I(s^0) \wedge \text{path}(s^0, s^1, \dots, s^i) \wedge \neg \bigwedge_{j=0}^i (p(s^j)))$

Nincs $i+1$ hosszú ciklusmentes út, (amiben nincs másik kezdőállapot)

then return (s^0, s^1, \dots, s^i)

if not $\text{SAT}(I(s^0) \wedge \bigwedge_{j=1}^{i+1} (\neg I(s^j)) \wedge \text{lfp}\text{ath}(s^0, s^1, \dots, s^{i+1}))$

or not $\text{SAT}((\text{lfp}\text{ath}(s^0, s^1, \dots, s^{i+1}) \wedge \bigwedge_{j=0}^i p(s^j) \wedge \neg p(s^{i+1}))$

then return True

$i = i + 1$

end

Nincs $i+1$ hosszú ciklusmentes út „rossz” állapotra (közben „jó” állapotokat érintve)

Összefoglalás: A BMC használata

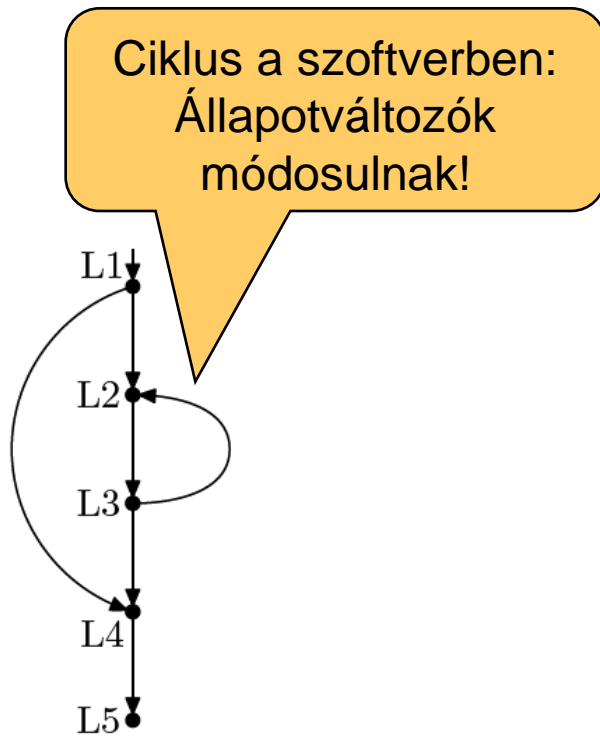
- Invariánsok vizsgálatára hatékony
- Helyes módszer ciklusmentes utakat használva
 - Ha van ellenpélda az adott kihajtogatási korlátig, azt megtalálja
 - Ha ellenpéldát talál, akkor az valódi ellenpélda
- Állapottér kezelés
 - SAT megoldó: szimbolikus technika, logikai függvényeken
 - Adott kihajtogatásig részleges eredmény kapható
- Legrövidebb ellenpélda keresése
 - Tesztgeneráláshoz használható
- Automatikus módszer
 - A korlát kijelölése lehet heurisztikus (az állapottér „átmérője”)
- Eszközök:
 - Pl. Symbolic Analysis Laboratory (SAL): sal-bmc, sal-atg

Az Intel eredményei (hardver verifikáció)

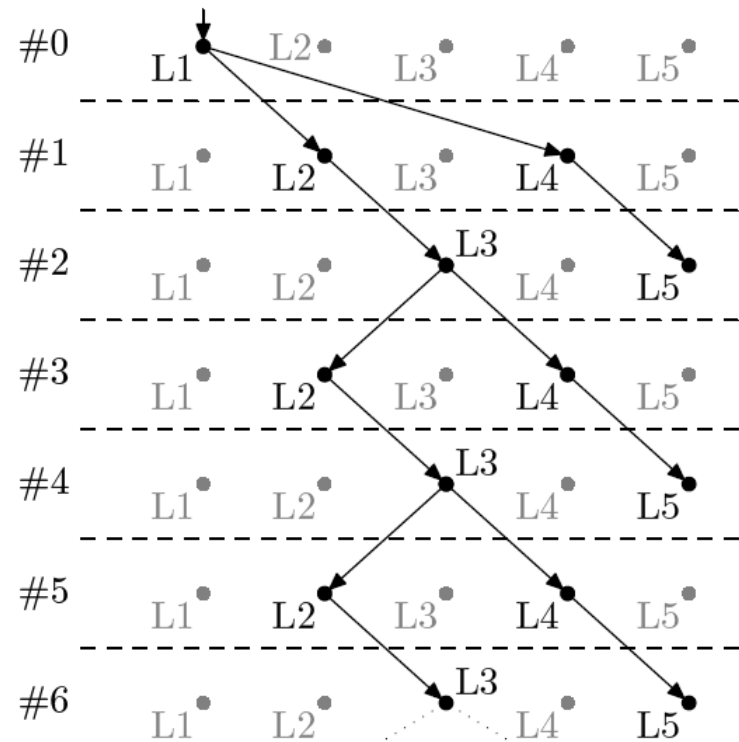
Model	k	Forecast (BDD)	Thunder (SAT)
Circuit 1	5	114	2.4
Circuit 2	7	2	0.8
Circuit 3	7	106	2
Circuit 4	11	6189	1.9
Circuit 5	11	4196	10
Circuit 6	10	2354	5.5
Circuit 7	20	2795	236
Circuit 8	28	—	45.6
Circuit 9	28	—	39.9
Circuit 10	8	2487	5
Circuit 11	8	2940	5
Circuit 12	10	5524	378
Circuit 13	37	—	195.1
Circuit 14	41	—	—
Circuit 15	12	—	1070

Alkalmazás szoftverek esetén: A ciklusok problémája

A ciklusok bejárása új állapotokat eredményez!



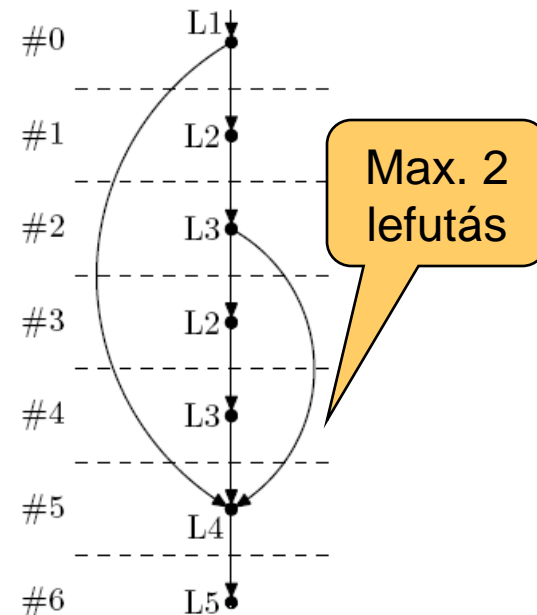
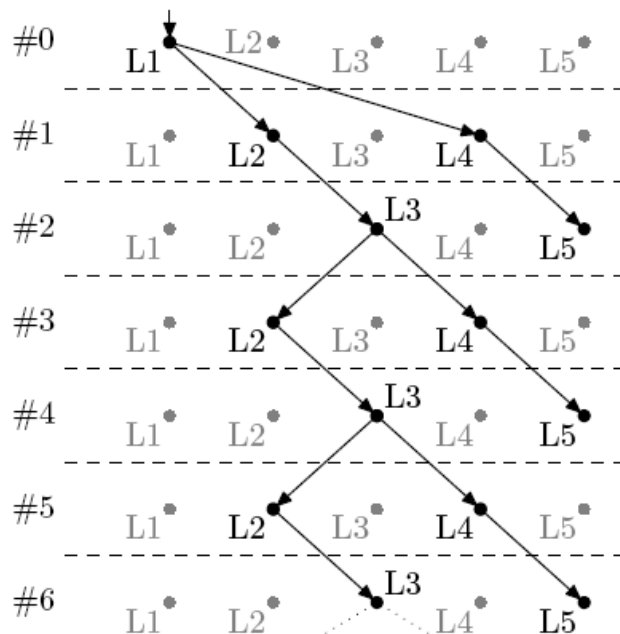
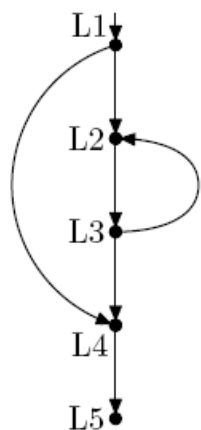
Vezérlési gráf (CFG) példa



Teljes kihajtogatás

Korlátozott ciklusbejárás

- Modell kihajtogatás lehetőségei:
 - Alapeset: Teljes kihajtogatás (path enumeration)
 - Mindig szisztematikusan előre minden lehetséges ágon
 - Korlátozott ciklusbejárás (loop unrolling)
 - Ciklusokra egyenként **lefutási korlátot** adni és úgy kibontani



Szoftver modellellenőrzés

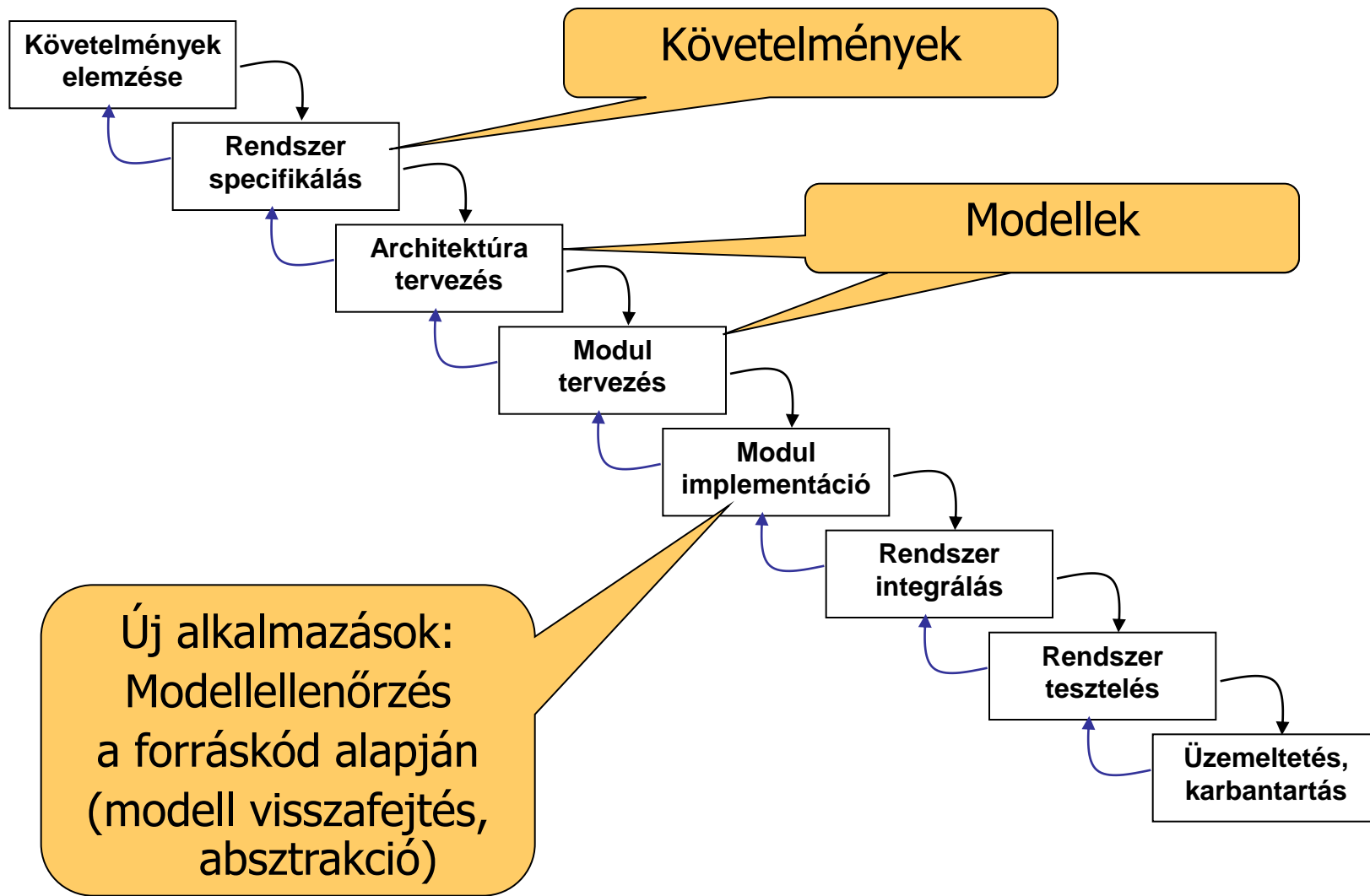
- F-SOFT (NEC):
 - Hagyományos teljes széthajtogatás
 - Unix rendszerprogramokra alkalmazták (pl. pppd)
- CBMC (CMU, Oxford University):
 - C, SystemC támogatása
 - Korlátozott ciklusbejárás (loop unrolling)
 - Egyes Linux, Windows, MacOS rendszerkönyvtárak támogatása
 - Integer aritmetikai műveletek leképzése:
 - Bitvektor szintű megvalósítás („bit-flattening”, „bit-blasting”)
 - CBMC SMT megoldóval:
 - Satisfiability Modulo Theories: Kiterjesztés különböző domének kezelésére (pl. integer aritmetika)
- SATURN:
 - Korlátozott ciklusbejárás: Max. 2 lefutás
 - Teljes Linux kernel ellenőrizhető: Null pointer hivatkozásokra

Összefoglalás: Hatékony technikák modellellenőrzéshez

- **Szimbolikus modellellenőrzés**
 - ROBDD alakban kezelt karakterisztikus függvények
 - „Jól strukturált” problémák esetén hatékony
 - Pl. azonos viselkedésű résztvevők protokollokban
 - Változók sorrendezésétől is függ a méret
- **Korlátos modellellenőrzés invariánsokra**
 - Logikai függvények igazságának keresése (**SAT** eszköz)
 - Korlátos hosszúságú ellenpéldák keresése
 - Ha ad ellenpéldát, az mindenképpen érvényes
 - Ha nincs ellenpélda, az még nem végleges eredmény (lehet, hogy hosszabb az ellenpélda)
 - Tesztgenerálásra jól alkalmazható

A modellellenőrzés jellemzői

Modellellenőrzés a tervezési folyamatban



A modellellenőrzés kedvező tulajdonságai

- Lehetséges nagy modelleméretet is kezelni
 - Akár 10^{20} , de példa van 10^{100} -nál nagyobb méretre is
 - Ez a rendszermodell mérete (pl. automaták hálózata)
 - Hatékony technikák: Szimbolikus, SAT alapú (korlátos)
- Általános módszer
 - Szoftver, hardver, protokollok, ...
- Teljesen automatikus eszköz, nem szükséges tervezői intuíció, erős matematikai háttérismeret
 - Tételbizonyítás ennél bonyolultabb!
- Ellenpéldát generál, ami segít a hibák javításában

2007. évi Turing Award a modellellenőrzés kifejlesztőinek:
E. M. Clarke, E. A. Emerson, J. Sifakis (1981)

A modellellenőrzés hiányosságai

- Skálázhatóság
 - Explicit állapottér bejárást alkalmaz
 - Hatékony technikák vannak ugyan erre, de nem garantált a jó skálázhatóság
- Elsősorban vezérlés-orientált alkalmazásokra
 - Komplex adatstruktúrák hatalmas állapotteret jelentenek
- Nehéz az eredményeket általánosítani
 - Ha egy protokoll helyes 2 résztvevő esetén, akkor helyes-e N résztvevő esetén?
- A követelmények formalizálása nem egyszerű
 - Temporális logika „nyelvjárások” alakultak ki különböző alkalmazási területeken
 - Példa: PSL (Property Specification Language, IEEE szabvány)