Modell alapú tesztgenerálás

Majzik István
BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Modellek (informális) szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibakészlet alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia relációk tesztgeneráláshoz
- Eszközök a tesztgeneráláshoz

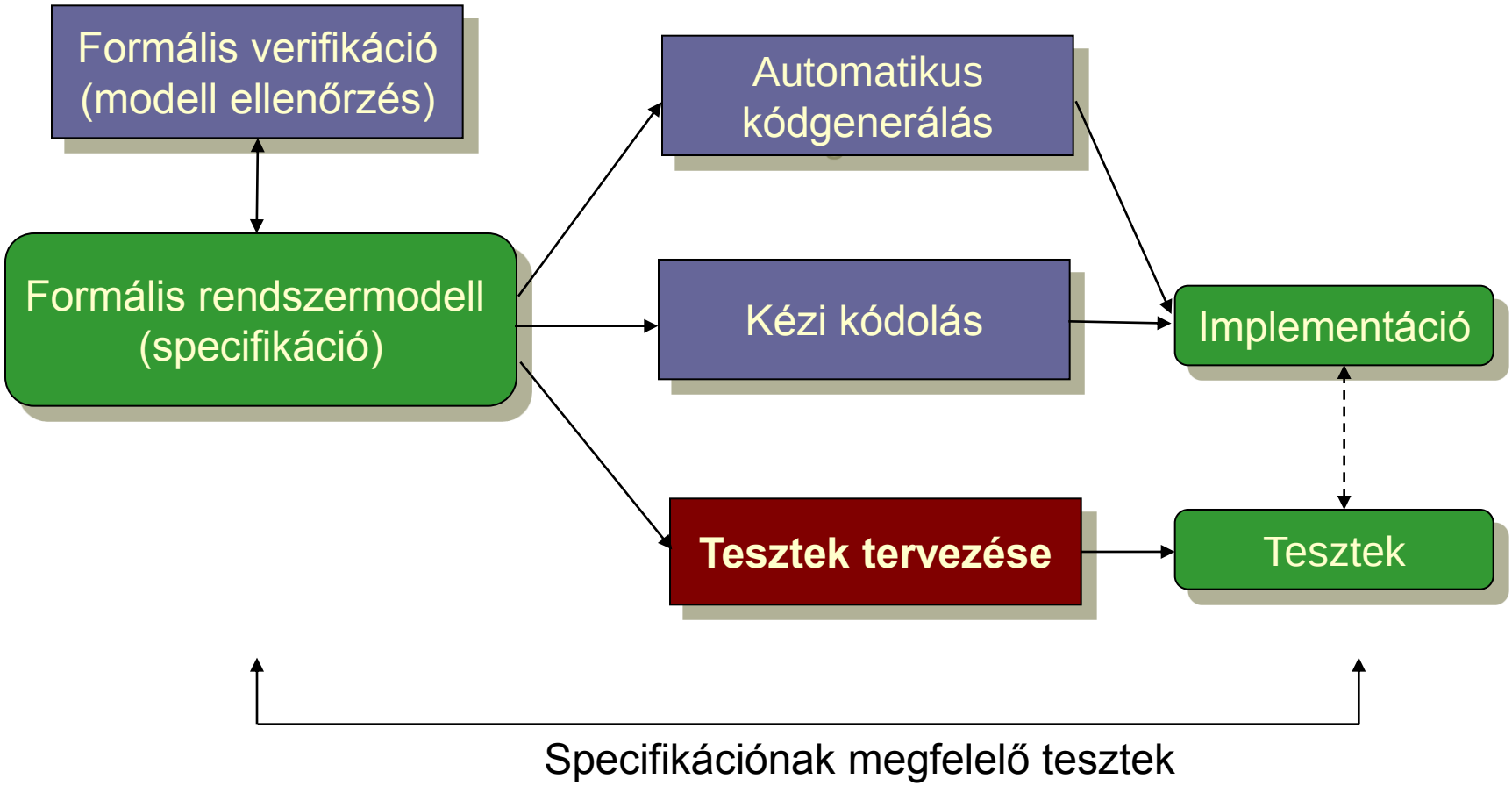
Példa: Modellek (UML) felhasználása a tesztelésben

- Használati eset diagram:
  - Validációs tesztelés: tesztelendő használati esetek
- Osztály- és objektumdiagram
  - Modultesztelés: komponensek, interfészek azonosítása
- Állapottérkép és aktivitás diagram:
  - Modultesztelés: referencia struktúra alapú teszteléshez
- Üzenet-szekvencia és együttműködési diagram:
  - Integrációs tesztelés: forgatókönyvek származtatása
- Komponens diagram:
  - Rendszertesztelés: tesztelendő fizikai komponensek
- Telepítés diagram:
  - Rendszertesztelés: teszt konfiguráció

Tartalomjegyzék

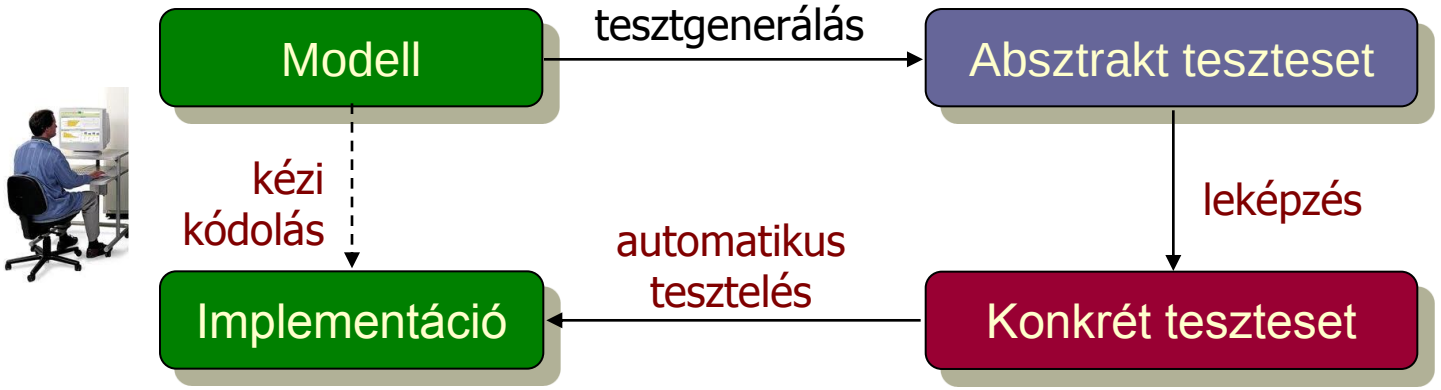
- Motiváció
  - Modellek szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibakészlet alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia relációk tesztgeneráláshoz
- Eszközök a tesztgeneráláshoz

Modell alapú fejlesztési folyamat (részlet)

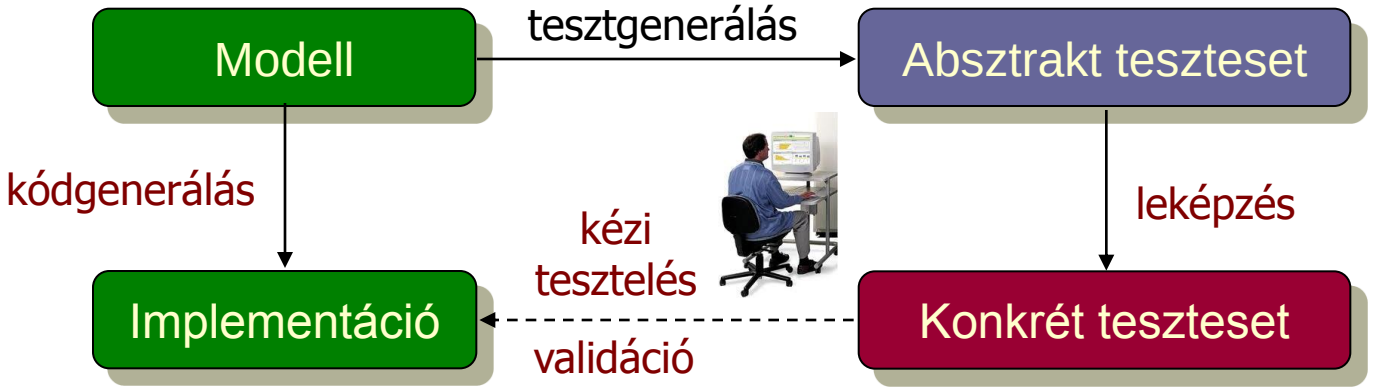


Használati esetek

- Kézi kódolás esetén: Konformancia ellenőrzés

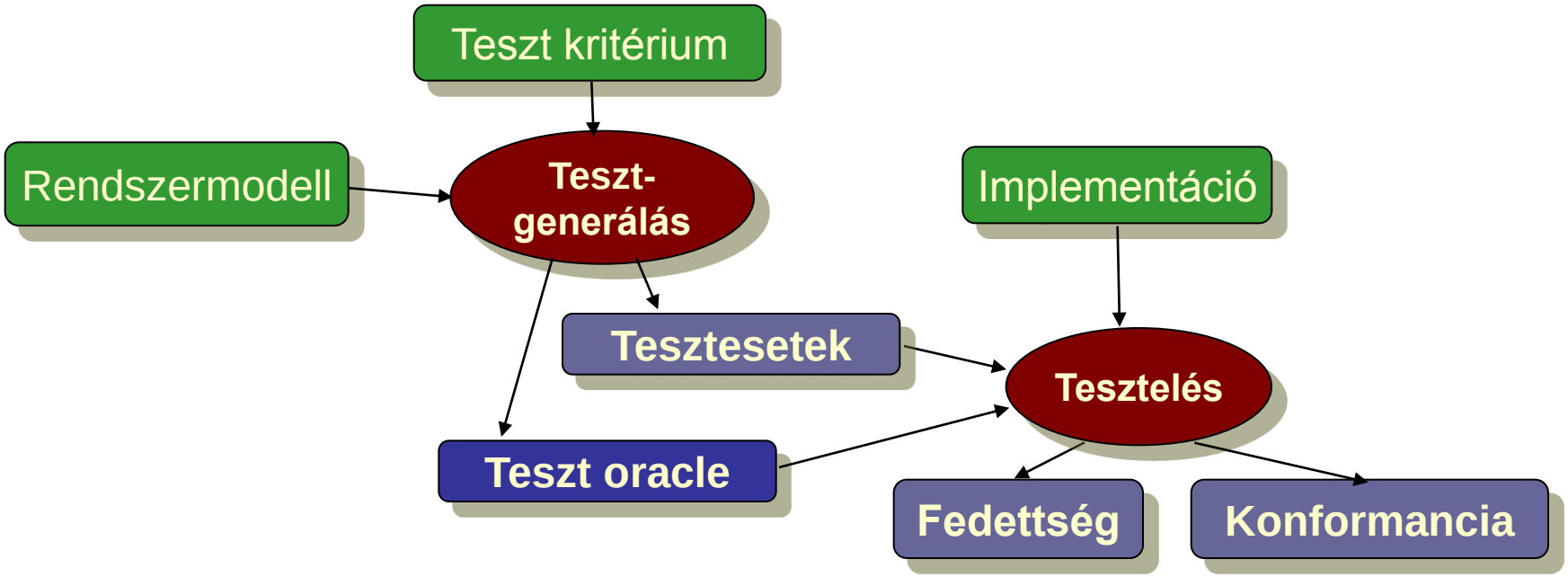


- Automatikus kódgenerálás esetén: Validáció



Modell alapú tesztelés alapfeladatai

- Rendszermodell és tesztelési kritérium alapján:
  - Tesztgenerálás (viselkedéshez, fedettséghez)
  - Teszt kiértékelő generálás (test oracle szintézis)
  - Teszt fedettség vonatkoztatása a modellre
  - Konformancia megállapítása a modellhez (mint specifikációhoz)



Tartalomjegyzék

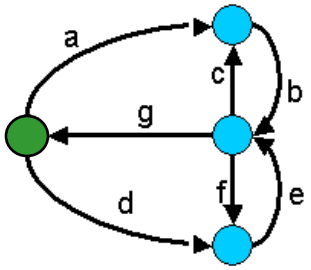
- Motiváció
  - Modellek szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibakészlet alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia relációk tesztgeneráláshoz
- Eszközök a tesztgeneráláshoz

Tipikus alkalmazási terület

- Modell: Állapot alapú, eseményvezérelt működés
  - Eseményre triggerelt állapotátmenetek
  - Akciók (mint válasz jellegű kimenetek)
- Jellegzetes alkalmazások
  - Felhasználói felületek, webes alkalmazások
  - Beágyazott vezérlők
  - Kommunikációs protokollok
- Formalizmusok:
  - Automaták (FSM; Mealy, Moore, Büchi, …)
  - Magasabb szintű formalizmusok leképezhetők
    - UML állapottérkép, SCADE Safe Statechart, Simulink Stateflow, …
- Gráfelméleti algoritmusok
  - Algoritmus létezik sokféle tesztelési feladathoz
  - Optimális tesztek: Tipikusan NP-teljes algoritmusok ☹

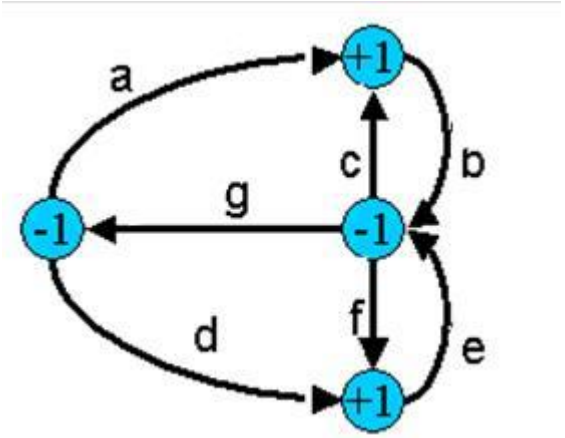
Gráfelméleti algoritmus átmenet fedéshez

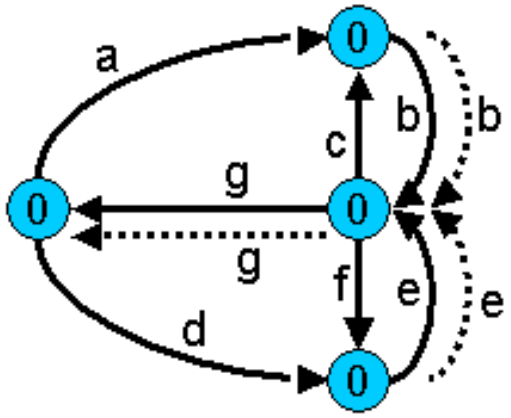
- Problémák megfeleltetése
  - Tesztelési probléma: Átmenetek fedése
    - Minden átmenet fedése teszt szekvenciával
    - A teszt szekvencia vigyen vissza a kezdeti állapotba
  - Gráfelméleti probléma: „New York-i utcaseprő” probléma
    - Egy irányított gráfban mi az a (legrövidebb) bejárási szekvencia, ami minden élet bejár és a kezdeti helyre visz vissza?
    - (Ugyanez nem irányított gráfban: „Kínai postás” probléma)



- Megoldás alapötlete: Euler-gráf → Euler-kör
  - Helyek polaritásainak számítása: Bejövő mínusz kimenő élek száma
  - Olyan élek duplikálása, amelyek pozitívtól negatív polaritású helyekig vezetnek, amíg minden hely nulla polaritású nem lesz
  - Euler-kör keresése az így adódó gráfban (lineáris algoritmus)
    - Euler-kör: Minden élet bejár; ilyen gráfban biztosan képezhető
  - Az Euler-kör bejárása adja a teszt szekvenciát

Egy példa átmenet fedéshez





Eredeti gráf
hely polaritásokkal

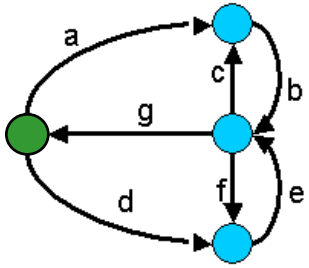
Duplikált élekkel
kiegészített gráf (így Euler-gráf)

Bejárási szekvencia (Euler-kör):

a b c b f e g d e g

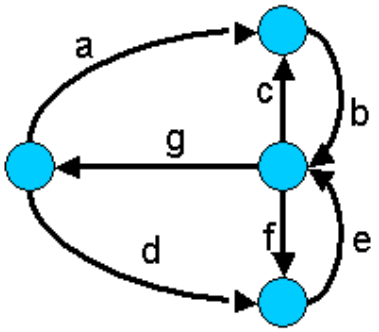
Gráfelméleti algoritmus átmenet kombináció fedéshez

- Problémák megfeleltetése
  - Tesztelési probléma: Átmenet kombinációk fedése
    - Minden lehetséges, egymás után n számú átmenetből álló sorozat fedése a teszt szekvenciával
    - A teszt szekvencia vigyen vissza a kezdeti állapotba
    - Legegyszerűbb eset: Minden lehetséges átmenet-pár fedése
  - Gráfelméleti probléma: „Bankrabló” (safecracker) szekvencia
    - (Legrövidebb) élszekvencia, amiben minden lehetséges n hosszú élsorozat előfordul (legegyszerűbb eset: n=2)

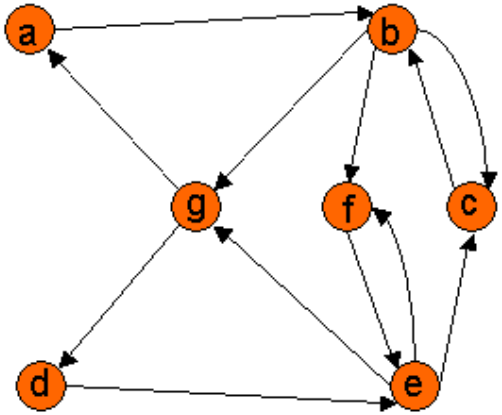


- Megoldás alapötlete n=2-re (de Bruijn algoritmus):
  - Duális gráf megkezdése: Az eredeti gráf éleiből helyek lesznek
  - Az eredeti gráfban létező élpárok esetén él behúzása a duális gráfba az élek által meghatározott helyek közé
  - A duális gráf kiegészítése (élek duplikálásával) Euler-gráffá
  - Az így kapott gráfban az Euler-kör adja a teszt szekvenciát

Egy példa átmenet kombináció fedéshez



Eredeti gráf

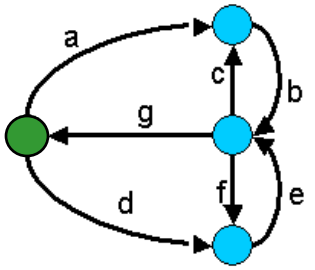


Duális gráf az élpárokkal

Bejárási szekvencia a duális gráf alapján élpárok fedéséhez:

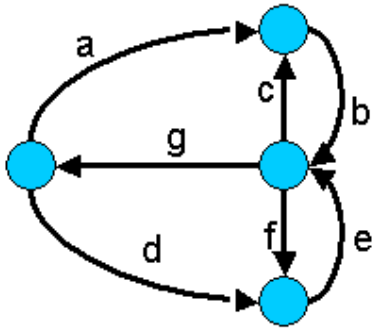
a b c b f e c b g d e f e g

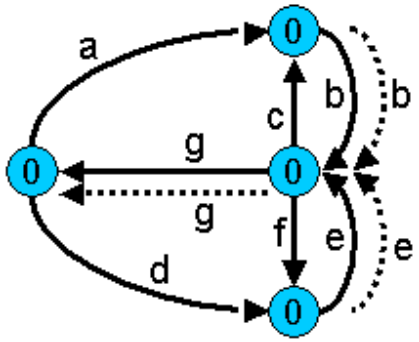
Gráfelméleti algoritmus konkurens átmenet fedéshez



- Problémák megfeleltetése
  - Tesztelési probléma:
    Konkurens tesztelés átmenetek fedéséhez
    - Teljes átmenet fedés a cél, de több tesztelő van
    - Célszerű egyenletesen megosztani a problémát, hogy a legrövidebb idő alatt végezzenek; mindegyik a kezdőállapotból kezd
    - Feltétel: Kezdőállapotba vihető (resetelhető) a rendszer
  - Gráfelméleti probléma: „Utcaseprő brigád” probléma
- Megoldás: Egy heurisztika (nem optimális megoldás)
  - Egy-egy bejáráshoz k felső határ megadása
  - Olyan élszekvencia keresése, amely a legtöbb eddig nem érintett élet tartalmazza, de legfeljebb k hosszú; a végén kezdőállapotba vezérelve a bejárást
  - Ezután újabb élszekvenciák felvétele, amíg van be nem járt él
  - A k felső határ csökkentésével lehet próbálkozni

Egy példa konkurens átmenet fedéshez





Eredeti bejárási szekvencia (Euler-kör, egy tesztelő):

a b c b f e g d e g

Egy lehetséges (nem optimális) megosztás:

- Tesztelő 1: a b c b f e g (7 időegység kell)
- Tesztelő 2: d e g

Egy jobb megosztás (heurisztikával):

- Tesztelő 1: a b c b g (5 időegység kell)
- Tesztelő 2: d e f e g

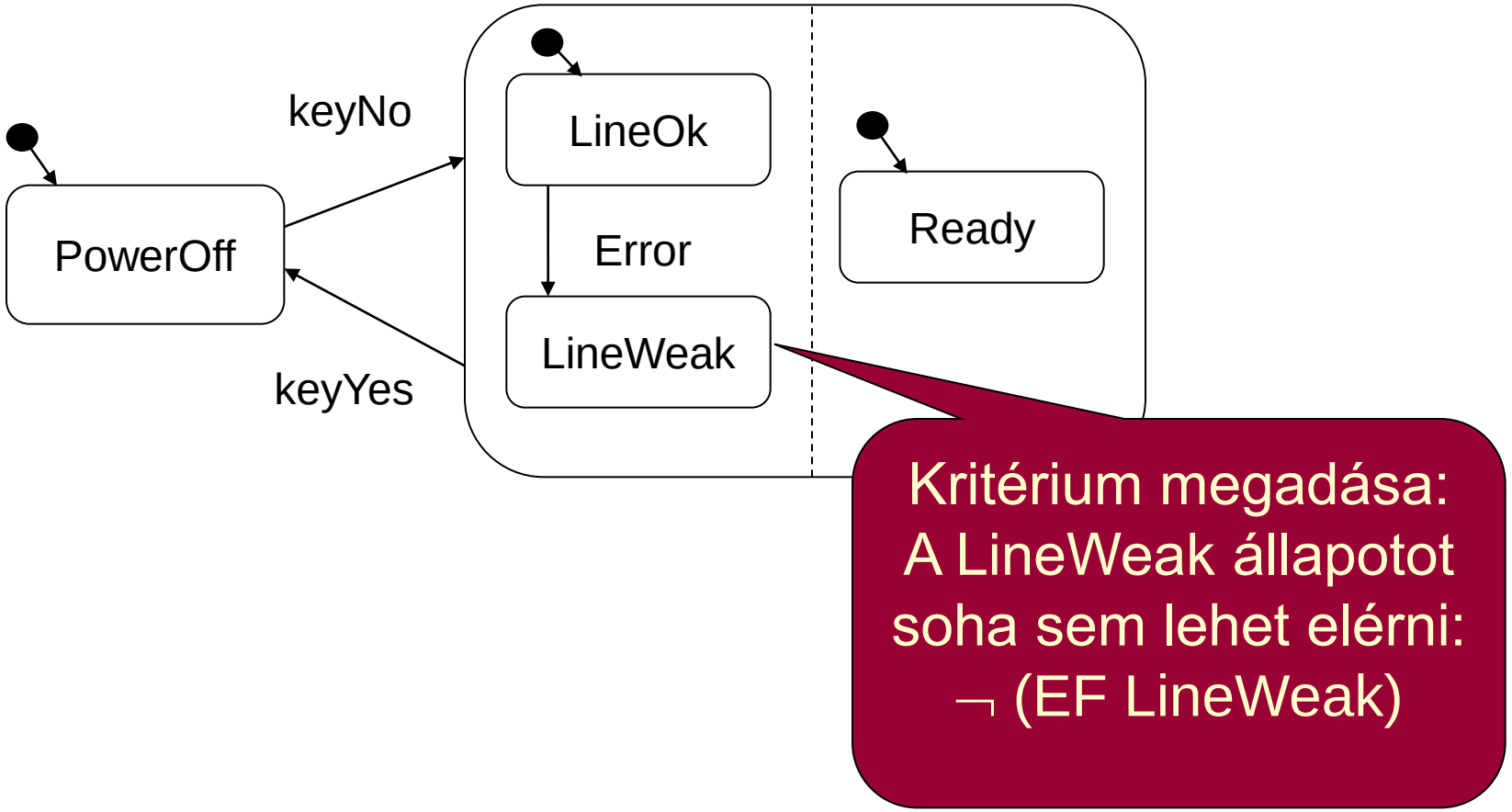
Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Modellek szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibakészlet alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia relációk tesztgeneráláshoz
- Eszközök a tesztgeneráláshoz

Alapötlet

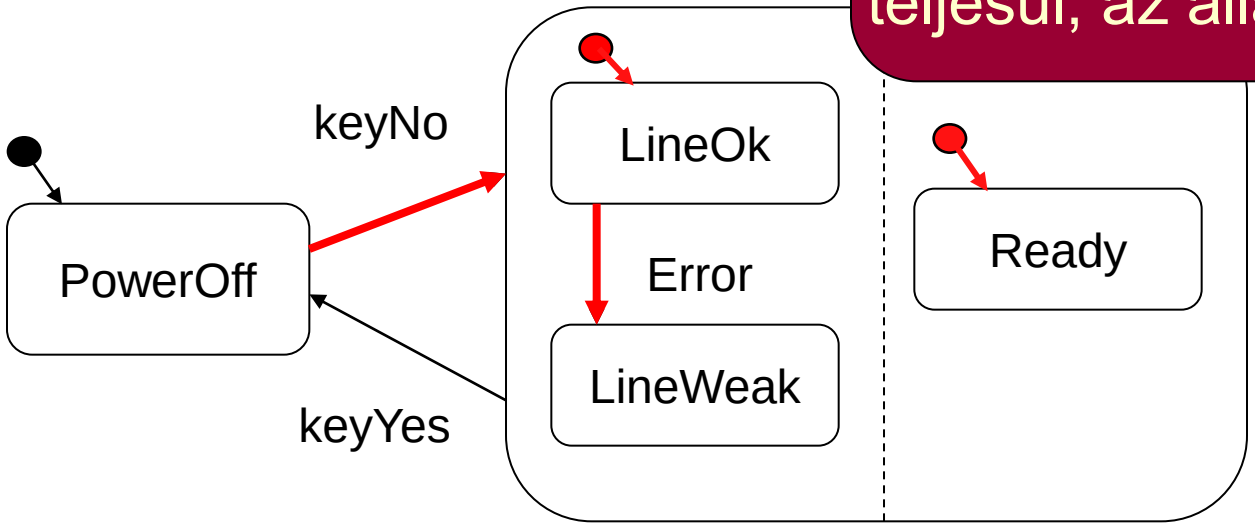
- Tipikus tesztelési kritériumok:
  - Vezérlés alapú:
    - Állapotok fedése, átmenetek fedése
    - Be- és kimenő átmenet-párok fedése állapotokhoz
  - Adatfolyam alapú:
    - Változó definiálások és felhasználások fedése
- Tesztgeneráláshoz szükséges:
  - Állapottér bejárása ← Modellellenőrző is ezt csinálja
- Alapötlet:
  - Járja be a modellellenőrző az állapotteret!
  - Irányítsuk úgy, hogy az általa adott ellenpélda legyen a teszteset

A modellellenőrző használata tesztgenerálásra



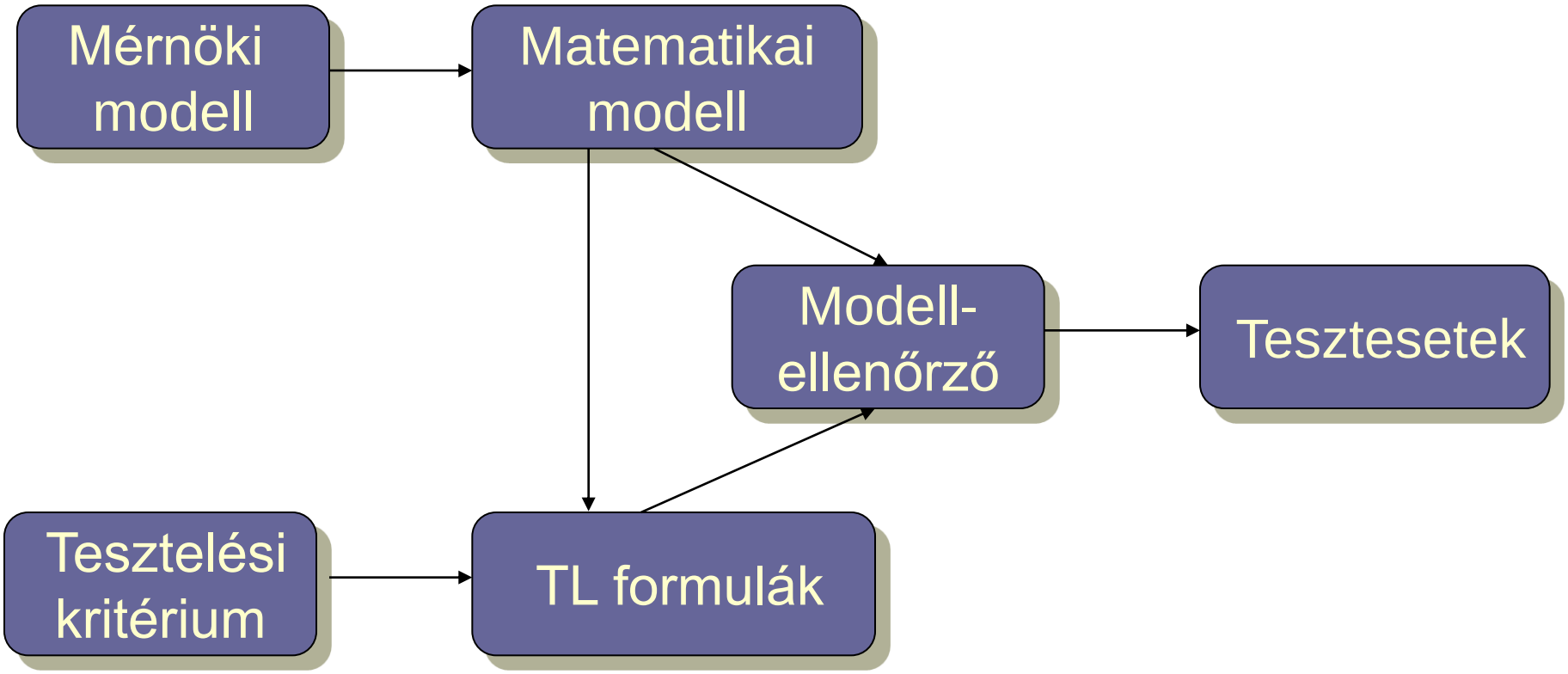
A modellellenőrző használata tesztgenerálásra

A modellellenőrző ezzel az ellenpéldával demonstrálja, hogy a tulajdonság nem teljesül, az állapot elérhető.

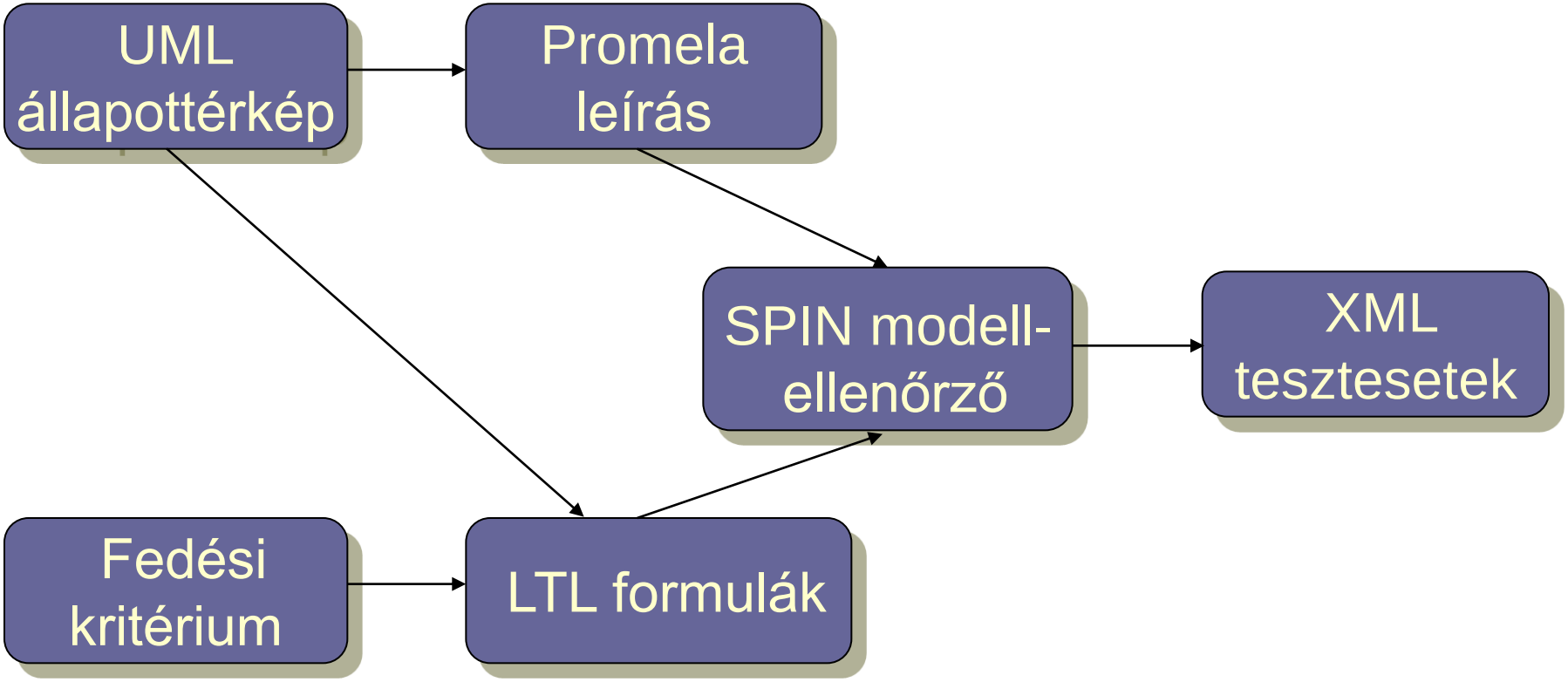


Ez viszont pontosan egy, a LineWeak állapotot lefedő teszteset

Automatikus tesztgenerálás



Egy megvalósítás



Fedettségi kritériumok mint TL kifejezések

- Címkék a modellben v változóra (predikátumok):
  - def(v)
  - c-use(v)
  - p-use(v)
  - implicit-use(v)

A változó használata implicit átmenet feltételében.
Implicit átmenet: Helyben maradást jelent az adott feltétel mellett; ez is tesztelhető.

- Karakterisztikus függvények (állapotváltozókkal):
  - s: adott s állapotban való tartózkodás
  - t: adott t átmenet tüzelése (állapot és következő állapot)
- Állapothalmazok ($\rightarrow$ predikátumok diszjunkcióval):
  - d(v): minden def(v)
  - u(v): minden c-use(v) vagy p-use(v)
  - im-u(v): minden implicit-use(v)
  - start: megfelelő állapotok új teszthez (pl. kezdőállapotok)

Vezérlés alapú fedettségi kritériumok

- Állapotfedés:

  {¬EF s | s alapszintű állapot}

Kritériumhalmaz!

Ha megfelelő kezdőállapot is kell újabb teszthez:

{¬EF (s ∧ EF start) | s alapszintű állapot}

(a további képletekben EF start kihagyva)

- Gyenge átmenet fedés:

  {¬EF t | t átmenet}

- Erős átmenet fedés:

  {¬EF t | t átmenet} ∪ {¬EF it | it implicit átmenet}

Erős fedés: Implicit átmenetek (helyben maradás) is tesztelve

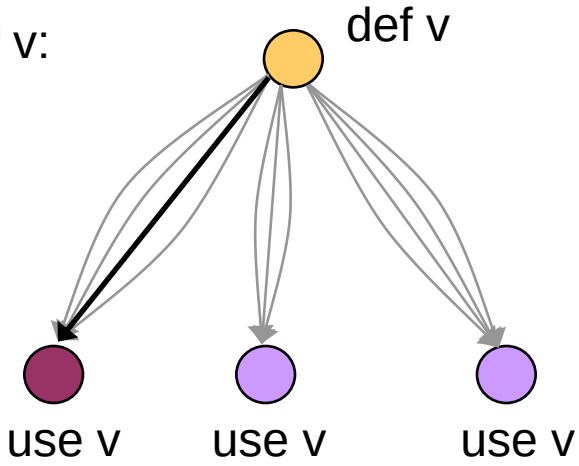
Adatfolyam alapú fedettségi kritériumok (ismétlés)

- **All-defs:**

minden v, minden def v:

egy def-clear útvonal:

egy use v:

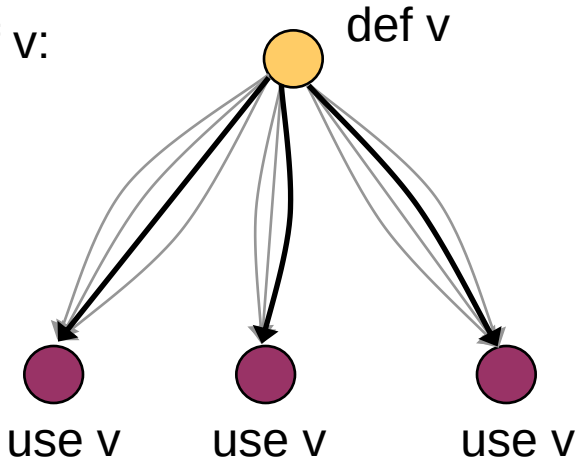


- **All-uses:**

minden v, minden def v:

egy def-clear útvonal:

minden use v:



Adatfolyam alapú fedettségi kritériumok

- Gyenge all-defs fedés:

  $\{\neg EF\,(t \wedge EX\,E(\neg d(v)\ U\ u(v))) \mid v \text{ változó}, t \in d(v)\}$

Egy def-clear útvonal tesztelve minden def(v) és egy use(v) között

- Gyenge all-uses fedés:

  $\{\neg EF\,(t \wedge EX\,E(\neg d(v)\ U\ t')) \mid v \text{ változó}, t \in d(v), t' \in u(v)\}$

Egy def-clear útvonal tesztelve minden def(v) és minden use(v) között

- Erős all-defs fedés:

  $\{\neg EF\,(t \wedge EX\,E(\neg d(v)\ U\ (u(v) \vee \text{im-}u(v))))$
  $\mid v \text{ változó}, t \in d(v)\}$

Implicit változó használat (~ helyben maradás feltétele) is tesztelve

- Erős all-uses fedés:

  $\{\neg EF\,(t \wedge EX\,E(\neg d(v)\ U\ t'))$
  $\mid v \text{ változó}, t \in d(v), t' \in u(v) \cup \text{im-}u(v)\}$

Jellegzetességek

- Modellellenőrző képességei:
  - Tipikusan csak egy ellenpéldát generál
  - Így nem generálhatók tesztek olyan fedettségi kritériumokhoz, ahol minden ellenpéldára szükség van
    - Pl. all-du-paths kritérium
      (minden def-clear útvonal egy def-use párhoz)
- Absztrakt teszteset adódik
  - Csak a bemeneti szekvencia kötött
  - Elvárt kimeneteket meg kell határozni (pl. szimulációval)
  - Konkrét végrehajtásra le kell képezni (pl. bemeneti hívásokra)

Optimalizáció

- Modellellenőrző feladata:
  - Állapottér hatékony bejárása: Gyorsan, kis tárigénnyel
- A tesztgeneráláshoz szükséges:
  Gyorsan minél rövidebb ellenpéldát találni
  → Speciális beállítások szükségesek a modellellenőrzőben
  - Legrövidebb/legkisebb tesztkészlet kiválasztása:
    NP-teljes probléma!
- Lehetőségek (pl. SPIN esetén):
  - Szélességi keresés az állapottérben (BFS)
  - Mélységi keresés, de mélységkorláttal (limited DFS)
  - Rövidebb ellenpélda iteratív keresése
  - Közelítő modell ellenőrzés (hash függvény az állapottároláshoz)
    - Bizonyos állapotokat nem jár be a keresés során
    - De ha talál ellenpéldát, az valós teszt lesz

Tesztgenerálási eredmények

Options (compile or run-time)	Time required for test generation	Length of the test sequences	Longest test sequence
-i	22m 32.46s	17	3
-dBFS	11m 48.83s	17	3
-i -m1000	4m 47.23s	17	3
-I	2m 48.78s	25	6
default	2m 04.86s	385	94
-I -m1000	1m 46.64s	22	4
-m1000	1m 25.48s	97	16
-m200 –w24	46.7s	17	3

Paraméterek:

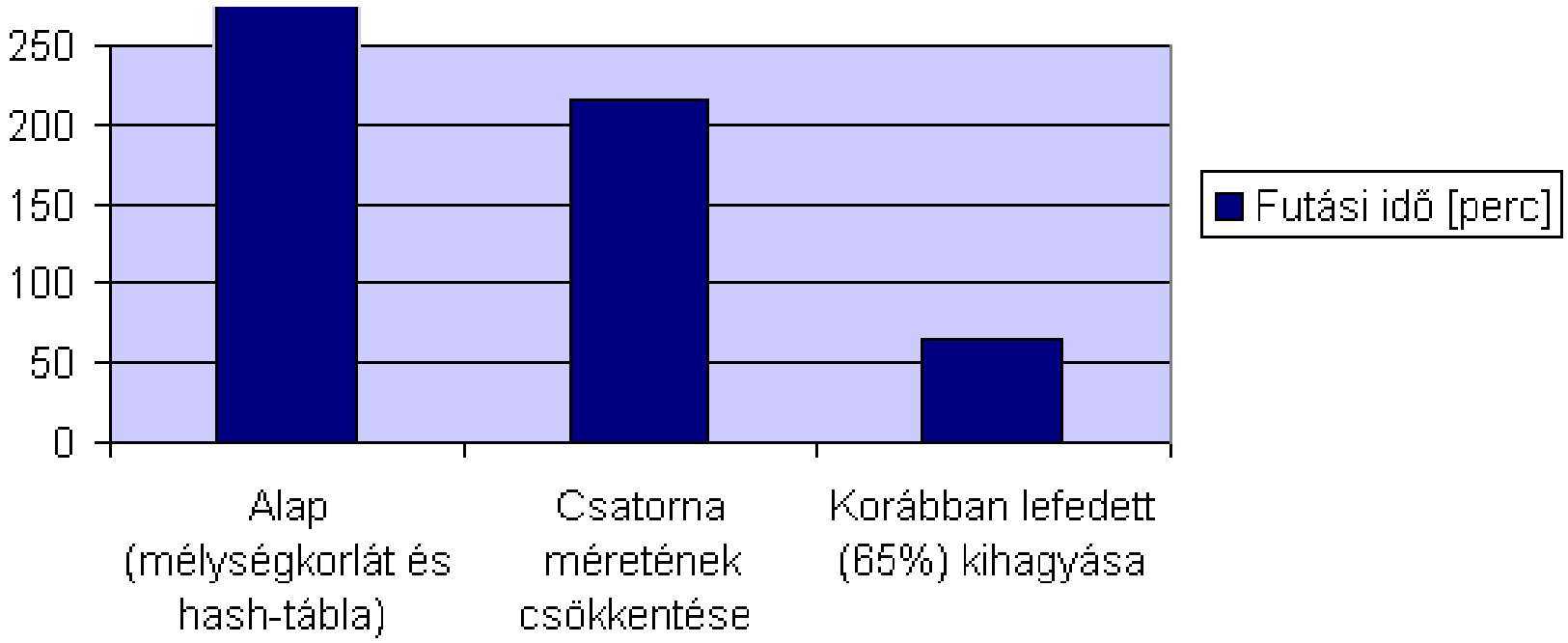
- -i iteratív, -I közelítő iteratív
- -dBFS szélességi keresés
- -m mélységi keresés korlátja
- -w hash tábla korlátja

Mobiltelefon viselkedését leíró állapotgép
(10 állapot, 11 átmenet)

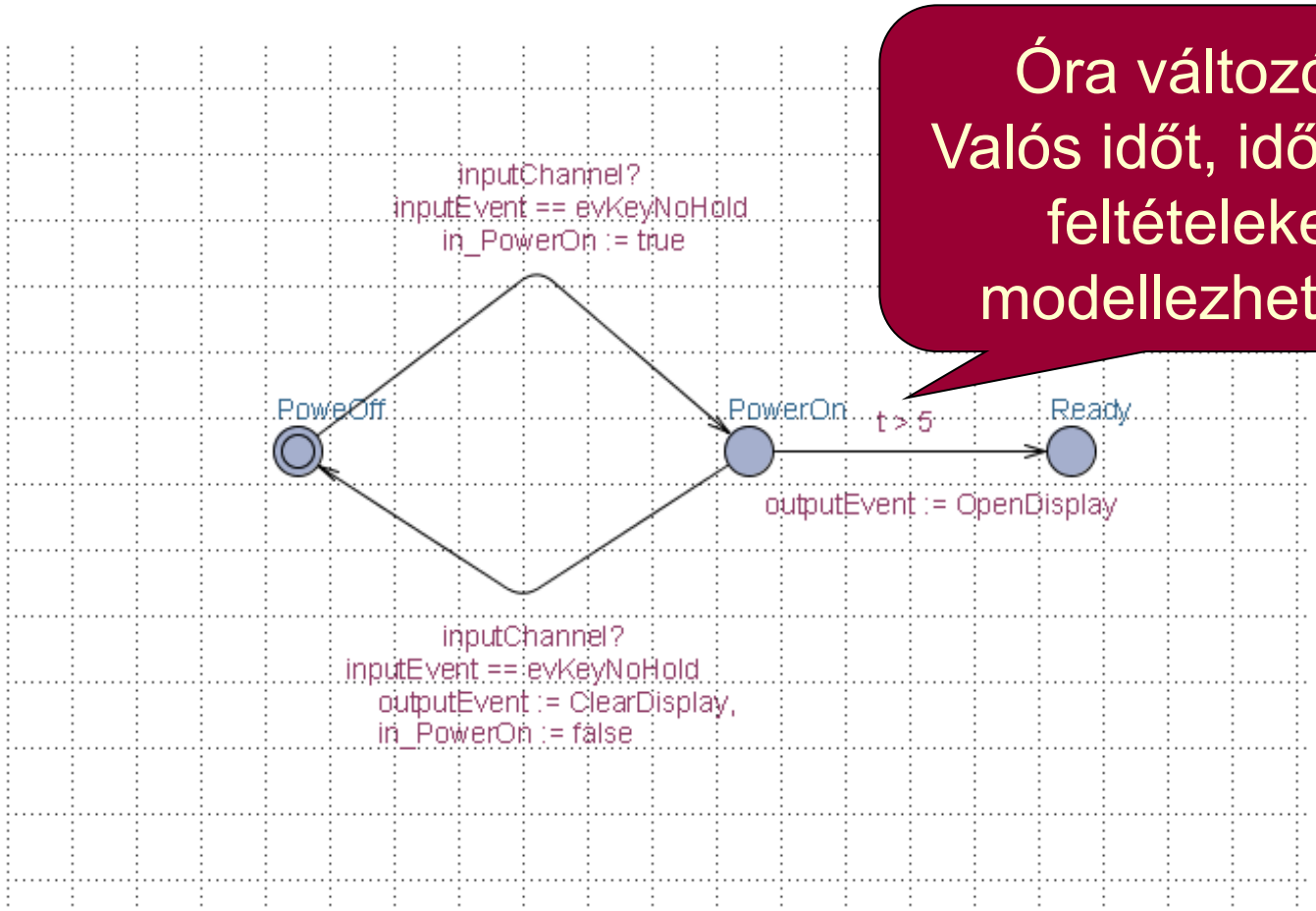
„Bitszinkronizációs protokoll” példa

- Példa: Több példányban tárolt bitek állításának szinkronizálása egy elosztott rendszerben
  - 5 objektum, 31 állapot, 174 átmenet
  - 2e+08 bejárandó állapot
- Kiegészítő technikák is szükségesek:
  - Erősen tömörítő állapottárolás alkalmazása (bitstate hashing)
  - Szűkítések a modellben: FIFO csatornák méretének csökkentése
  - Korábban lefedett kritériumok kihagyása
- További heurisztikák alkalmazása:
  - Mélyen fekvő állapotok tesztelése előbb

„Bitszinkronizációs protokoll”: Tesztek generálása teljes állapotfedéshez



Kiterjesztés valósidejű rendszerekre



Időzített automaták használata

Speciális modell ellenőrző: UPPAAL

Generált tesztek

State:
(input.sending mobile.PowerOn mobile1.LineOK mobile2.CallWait)
t=0 inputEvent=28 outputEvent=14

Delay: 6

State:
(input.sending mobile.PowerOn
t=6 inputEvent=28 outputEvent=1

A teszt időzítési viszonyok is szerepelnek a generált tesztesetben

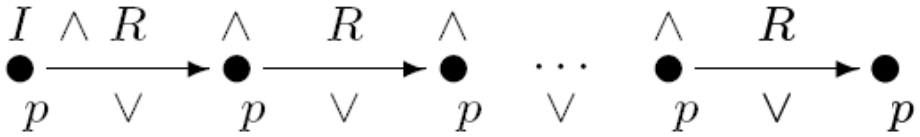
Transitions:
input.sending->input.sendInput { 1, inputChannel!, 1 }
mobile2.CallWait->mobile2.VoiceMail { inputEvent == evKeyYes && t > 5 &&
in_PowerOn, inputChannel?, 1 }

Tartalomjegyzék

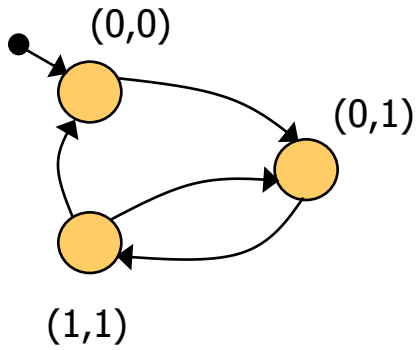
- Motiváció
  - Modellek szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibakészlet alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia relációk tesztgeneráláshoz
- Eszközök a tesztgeneráláshoz

Alapötlet: Korlátos modellellenőrzés alkalmazása

- SAT probléma megoldóinak használata
  - SAT megoldó: Boole függvényekhez keres helyettesítési értéket, ami a függvény értékét igazzá teszi
- A modell elemeinek leképzése logikai függvénybe:
  - Kezdőállapotokra vonatkozó predikátum: I(s)
  - Elérendő állapotokra vonatkozó predikátum: p(s)
  - Állapotátmeneti reláció: R(s, s')
    - Lépésenkénti „széthajtogatáshoz": $R(s_i, s_{i+1})$
- A logikai függvény felírása: Konjunkció
  - Kezdőállapotból indul: Az I(s) predikátum az első állapotra
  - Széthajtogatott átmenetek: Az $R(s_i, s_{i+1})$ reláció alkalmazásai
  - Elérendő állapot: A p(s) predikátum valahol fennáll



Példa: A modell leképzése logikai függvénybe

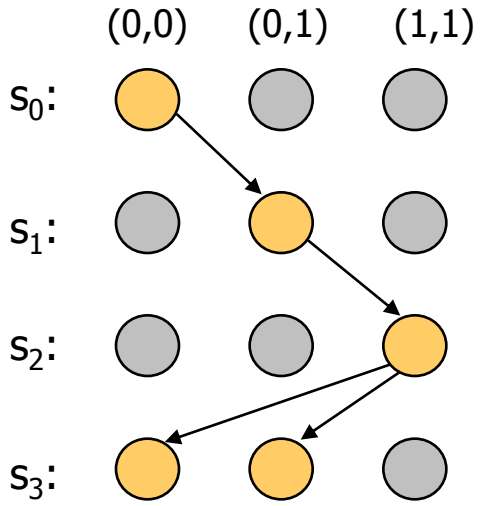


Kezdőállapot predikátum:

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

Állapotátmeneti reláció:

$$R(x,y,x',y') = (\neg x \wedge \neg y \wedge \neg x' \wedge y') \vee (\neg x \wedge y \wedge x' \wedge y') \vee (x \wedge y \wedge \neg x' \wedge y') \vee (x \wedge y \wedge \neg x' \wedge \neg y')$$



3 lépéses kihajtogatás a kezdőállapotból:

$$I(x_0,y_0) \wedge R(x_0,y_0,x_1,y_1) \wedge R(x_1,y_1,x_2,y_2) \wedge R(x_2,y_2,x_3,y_3)$$

SAT alapú tesztgenerálás fedési kritériumokhoz

- Formula konstruálás:
  - Kihajtogatás k lépésben a kezdőállapotból
  - Teszt kritérium megadása: TG formula, pl.:
    - Adott állapot elérése
    - Adott állapotátmenet végrehajtása
    - Adott modellrészlet bejárása, …

$$\exists s_0, s_1, \ldots, s_k : I(s_0) \wedge \bigwedge_{i=0}^{k-1} R(s_i, s_{i+1}) \wedge TG$$

Állapot-szekvencia | Modell széthajtogatás | Teszt cél

- Ha ez a formula kielégíthető, akkor az egy tesztet ad:
  - A teszt teljesíti a TG kritériumot
  - Ha nem kielégíthető a formula, akkor nincs teszt a kritériumhoz

Használhatóság

- A tesztgenerálás korlátai
  - Legfeljebb adott hosszúságú teszt generálható
    - Iteratívan növelhető a kihajtogatás korlátja
  - Így részleges megoldás adódik
    - Amit megtalál, az biztosan teszt eset lesz
    - Nem garantált, hogy megtalálja a teszt esetet (ha az hosszabb lenne, mint amit figyelembe veszünk)
- A modellből SAT probléma leképzése automatikus
- A TG teszt célok megadása egyszerűsíthető
  - C programokhoz: FQL nyelv teszt célokhoz (FSHELL)

    in /code.c/ cover @line(6),@call(f1) passing @file(code.c) \ @call(f2)
  - Elő- és utófeltételek megadása:
    - Van-e olyan teszt eset, amikor az utófeltétel nem teljesül?
    - Ellenpélda generálás

Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Modellek szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibakészlet alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia relációk tesztgeneráláshoz
- Eszközök a tesztgeneráláshoz

Hibakészletek használata

- Tapasztalatok a szoftver tesztelés során
  - Csatolási effektus (coupling effect): Azok a teszt esetek, amik egyszerű hibákat megtalálnak, bonyolultabbakra is hatékonyak
  - Kompetens programozó hipotézis: A programok általában jók, a hibák nagy része gyakran előforduló tipikus hiba
- Alapötlet:
  - Állítsunk elő olyan „mutáns” modelleket, amik tipikus hibákat reprezentálnak, és generáljunk ezek kimutatására teszteket
  - Ezek várhatóan bonyolultabb hibákhoz is jobbak a véletlen teszteknél
- Tipikus mutációk:
  - Aritmetikai operátorok felcserélése feltételekben
  - Akciók (műveletek, üzenetek) sorrendjének megváltoztatása
  - Akciók kihagyása
  - …

Tesztgenerálás hibakészlet alapján

- A tesztgenerálási feladat:
  - Olyan tesztek előállítása, amelyek különbséget tesznek az eredeti (hibamentes) és a mutáns (hibás) viselkedés között
  - Ezek ún. negatív tesztek (sikertelen teszt: nincs hiba!)
- Hogyan definiáljuk a „különbséget” két viselkedés között? Milyen különbség megengedett?
  - Más viselkedés megengedett-e a specifikált mellett?
  - Kihagyás (elmaradt kimenet) megengedett-e?
- Szokásos megoldások
  - Biztonságkritikus rendszer:
    - Szigorúan a specifikáció szerint
    - Teljes specifikáció szükséges
  - „Hétköznapi” rendszer, vagy fejlesztés közben végzett tesztelés:
    - A viselkedés beférjen a specifikáció keretei közé

k-ekvivalencia a teszteléshez

- Alkalmazás: Fekete doboz teszteléshez, IOLTS modellhez
  - Bemenetek egy s állapotban: in(s) – vezérelhetők
  - Kimenetek egy s állapotban: out(s) – megfigyelhetők
  - Kimeneti akció hiánya is formalizálható: Speciális δ akció
- A k-ekvivalencia definíciója:

  Azonos bemeneti sorozat mellett azonos kimenetek az első k lépésre

- Jelölések:

	Eredeti M modell:	Mutáns M' modell:
Kezdeti állapot predikátum:	$I(s_0)$	$I'(s'_0)$
Állapotátmeneti reláció:	$R(s_i, s_{i+1})$	$R'(s'_i, s'_{i+1})$

A modell kihajtogatása k lépésre: $I(s_0) \wedge \bigwedge_{i=0}^{k-1} R(s_i, s_{i+1})$

Mutáció alapú tesztgenerálás k-ekvivalencia alapján

- SAT formula konstruálás a k-ekvivalenciához:
  - Azonos bemeneti szekvencia mindkét modellre
  - Kihajtogatás k lépésben az eredeti modellre
  - Kihajtogatás k lépésben a mutáns modellre
  - Legalább egy különböző kimenet lesz a kimeneti szekvenciában

$$\bigwedge_{i=0}^{k} (\mathrm{in}(s_i) = \mathrm{in}(s_i')) \wedge I(s_0) \wedge \bigwedge_{i=0}^{k-1} R(s_i, s_{i+1}) \wedge I'(s_0') \wedge \bigwedge_{i=0}^{k-1} R'(s_i', s_{i+1}') \wedge \bigvee_{i=0}^{k} (\mathrm{out}(s_i) \neq \mathrm{out}(s_i'))$$

Egyező bemenetek | Eredeti modell | Mutáns modell | Eltérő kimenet

- Ha ez a formula kielégíthető, akkor az egy tesztet ad
  - A teszt különbséget tesz a modellek között:
    Kimutatja a mutációt, tehát a hiba felderítésére használható
  - Ha a formula nem kielégíthető, akkor ekvivalens a két modell

Mutáció alapú tesztgenerálás az IOCO reláció alapján

- Az IOCO reláció informálisan:
  - Azonos bemeneti szekvenciára az implementáció kimenetei részhalmazát képezik a specifikációban rögzített kimeneteknek (azaz „belefférnek” a specifikáció keretei közé)
    - Részleges viselkedés (kihagyás) megengedett, eltérő viselkedés nem
    - Többlet funkció megengedett a specifikációban nem rögzített bemeneti szekvenciára
  - A k-ekvivalenciánál megengedőbb konformancia reláció
- A teszt célja a mutáció kimutatása IOCO szerint:
  - Az eredeti modellben felvehető akciószekvenciára:
    Az elérhető állapotokban a mutáns által nyújtott kimenetek nem képezik részhalmazát az eredeti modell által nyújtott kimeneteknek
  - Tesztek generálása SAT megoldóval
    - Bonyolultabb a részhalmaz reláció vizsgálata miatt (itt nem írjuk fel)
  - A δ akció a teszt végrehajtás során mint timeout ellenőrizhető

Tartalomjegyzék

- Motiváció
  - Modellek szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibakészlet alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia relációk tesztgeneráláshoz
- Eszközök a tesztgeneráláshoz

További technikák: Tervkészítő (planner) használata

- Cél-orientált bejárás
- A tervkészítés elemei a tesztgeneráláshoz:
  - Kezdőállapot: Kiindulási (program)állapot
  - Célállapot: Elérendő (program)állapot
  - Operátorok (feltételek és hatások): Események/bemenetek hatására végrehajtott akciók, utasításblokkok
- Teszt: Terv a célállapot elérésére a kezdőállapotból
  - Operátor példányok halmaza
  - Részleges rendezési reláció az operátorok között
  - Ok-okozati kapcsolatok az operátorok között: feltételek és hatások
- A terv teljes sorrendezéssel teszt szekvenciaként használható (linearizálás)

További technikák: Evolúciós algoritmusok

- Evolúciós algoritmus:
  - Véletlen bejárások alapján „generált” teszt szekvenciák
  - Tesztkészlet módosítása: szekvencia mutáció, keresztezés (szekvencia részekkel)
  - Teszt kritériumoknak jobban megfelelő tesztkészlet megtartása és további módosítása
- Teszt kritériumok:
  - Vezérlési folyam alapú fedettségek (állapotok, útvonalak, forgatókönyvek integrációs teszteléshez)
  - Adatfolyam alapú kritériumok (all-defs, all-uses)
- Eszközök:
  - Java: DOTgEAr

További technikák forráskódra: Szimbolikus végrehajtás

- A szimbolikus végrehajtás módszere:
  - Programutak felmérése
  - Bejárási feltételek összeállítása az útvonal mentén a forráskódban (byte kódban) talált feltételek alapján
  - Szimbolikus: változókra vonatkozó (logikai) kifejezések használata
- Tesztgenerálás az utakhoz:
  - Bemeneti értékek generálása a bejárási feltételeknek megfelelően:
  - Kényszerkielégítési probléma megoldása SMT megoldóval
- Kihívások:
  - Ciklusok: nagyszámú bejárható útvonal
  - Bonyolult aritmetika támogatása az SMT eszközben
  - Külső függőségek (pl. library-k) kezelése
- Eszközök
  - Java: Symbolic PathFinder (Java PathFinder alapokon)
  - Net: PEX
  - C: CUTE, EXE, KLEE

Példák automatikus tesztgeneráló eszközökre I.

- Tesztelés modellellenőrzővel
  - FSHELL: C programokhoz
    - CBMC (korlátos modellellenőrző) generálja az ellenpéldát mint teszt szekvenciát strukturális tesztelési kritériumokhoz
  - BLAST:
    - Ellenpélda generálás adott teszt célhoz: Absztrakt teszteset
    - Szimbolikus végrehajtás (CEGAR-hoz): Teszt adatok generálása
  - UPPAAL CoVer, TRON:
    - Valósidejű rendszerek modellezése: Időzített automaták
    - UPPAAL modellellenőrző generálja a teszt eseteket
    - Konformancia reláció a teszteléshez:
      Relativised timed input-output conformance (RTIOCO)
      - Időkezelés nélkül konzisztens az IOCO relációval

Példák automatikus tesztgeneráló eszközökre II.

- Üvegdoboz tesztelés specifikáció alapján
  - JET: JUnit váz generálása JML elő- és utófeltételek alapján
    - Előfeltétel: Véletlen teszteléshez kötöttséget ad
    - Utófeltétel: Test oracle generálható
  - DART, CUTE, jCUTE, EXE
    - Adott állapothoz vezető bemeneti szekvencia: A feltételeket tartalmazó kényszerkielégítési probléma megoldása és szimbolikus végrehajtás
    - Feltételek a SAT bemenetéhez hasonlóan generálhatók
  - SpecExplorer (C#):
    - Spec# specifikáció alapján modell automata képzése (dinamikusan)
    - Bejárás: Gráfelméleti, legrövidebb út, vagy véletlen bejárás
    - Konformancia reláció modell és program között: Alternating simulation
  - DOTgEAr (Java):
    - Adatfolyam alapú kritériumok szerinti tesztelés is (all-defs, all-uses)
    - Evolúciós algoritmussal, véletlen bejárás alapján indítva és módosítva

Példák automatikus tesztgeneráló eszközökre III.

- Tesztelés absztrakt adattípusok alapján
  - Absztrakt adattípus definícióban szereplő axiómák alapján generált tesztesetek
  - Axió
- Spe
  - S
  - A
  - A
  - T
  - C
  - T

Absztrakt adattípusok: hordozó halmaz és műveletek

```
Type Boolean is
        sorts Bool
        opns
                false, true : -> Bool
                not : Bool -> Bool
                and : Bool, Bool -> Bool
        eqns
                forall x, y: Bool
                ofsort Bool
                        not(true) = false;
                        not(false) = true;
                        x and true = x;
```

Példák automatikus tesztgeneráló eszközökre III.

- Tesztelés absztrakt adattípusok alapján
  - Absztrakt adattípus definícióban szereplő axiómák alapján generált tesztesetek
  - Axiómákban szereplő változóknak értékadás
    - Ekvivalencia osztályok, szélső értékek
- Speciális modellezési nyelvek támogatása
  - Conformiq: UML (állapottérkép) modellekhez
  - AGATHA: UML, SDL, STATEMATE modellek
    - Kényszerkielégítési probléma megoldása (változók kezelése): útvonal bejárási feltételek generálása
  - Autolink: SDL és MSC specifikáció alapján
  - STG: LOTOS specifikációs nyelv
  - TDE/UML: Fedettségi kritériumok és kényszerek megadhatók
  - T-Vec, DesignVerifier, Reactis, AutoFocus: Simulink modellekhez

Összefoglalás

- Modell alapú tesztgenerálás
  - Fedési kritériumok teljesítéséhez
    - Vezérlés-orientált: állapotok, átmenetek fedése
    - Adatfolyam-orientált: def-use fedéshez
  - Hibamodell alapján (mutáció kimutatásához)
    - k-ekvivalencia reláció szerint
    - IOCO reláció szerint
- Eszközök
  - Direkt (gráfelméleti) algoritmusok
  - Modellellenőrzők: Ellenpélda generálása
  - SAT megoldók: Helyettesítési értékek generálása
  - Szimbolikus végrehajtás: Kényszerkielégítés bejáráshoz
  - Planner algoritmusok: Cél-orientált bejárás generálása
  - Evolúciós algoritmussal történő tesztgenerálás