Modell alapú tesztelés

Majzik István
BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

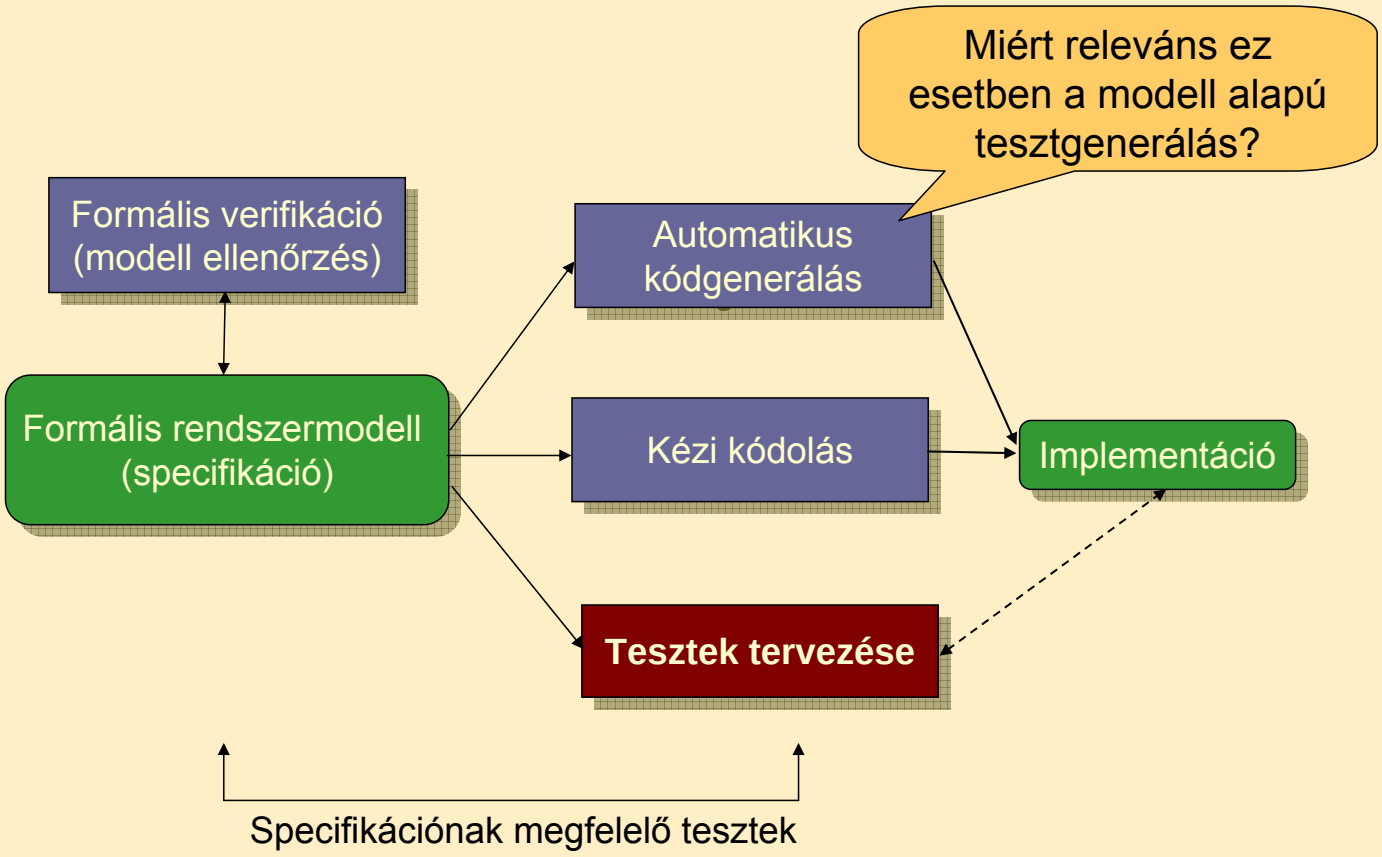
Tartalomjegyzék

Modell alapú tervezés (UML) és tesztelés

- 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

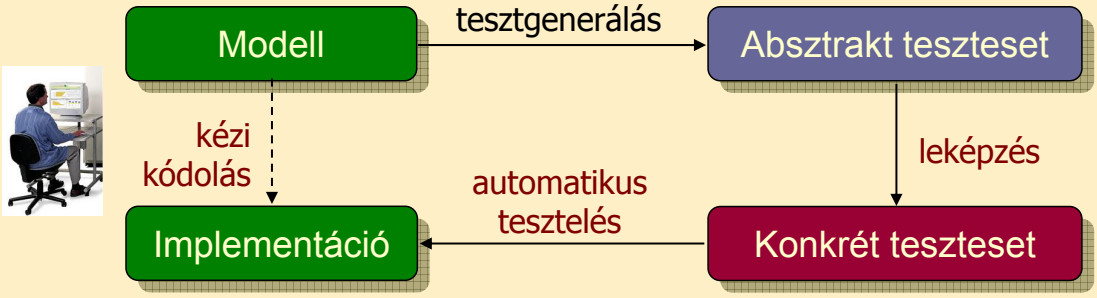
Tartalomjegyzék

Modell alapú fejlesztési folyamat (részlet)



Használati esetek

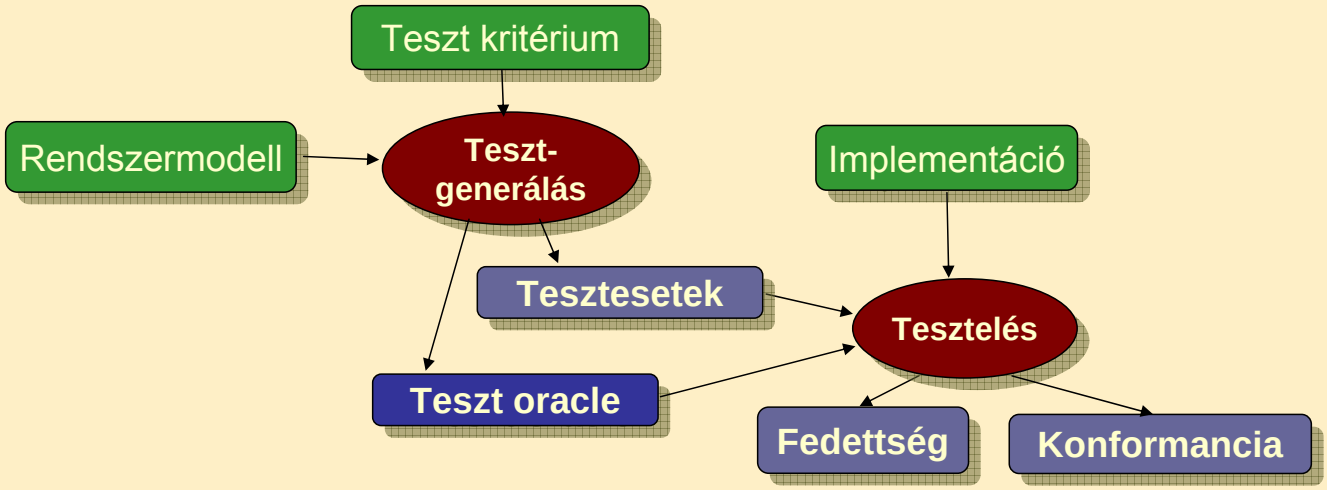
- Kézi kódolás esetén: Konformancia ellenőrzés



- Automatikus kódgenerálás esetén: Validáció

Modell alapú tesztelés alapfeladatai

- Rendszermodell és tesztelési kritérium alapján:
  - Tesztgenerálás (viselkedéshez, fedettséghez)
  - Teszt kiértékelő (test oracle) generálás
  - Teszt fedettség meghatározása
  - Konformancia megállapítása



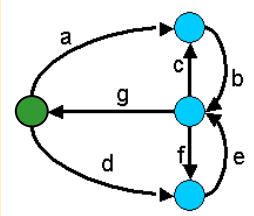
Tartalomjegyzék

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

Tipikus alkalmazási terület

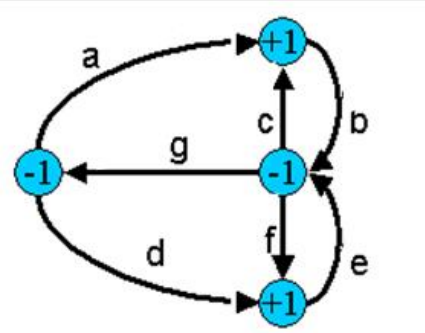
- Állapot alapú, eseményvezérelt működés
  - Eseményre triggerelt állapotátmenetek
  - Akciók (mint válasz jellegű kimenetek)
- Felhasználói felületek tesztelése
  - Eseményvezérelt működés
- Egyszerű modellek használhatók
  - Automaták (FSM; Mealy, Moore, Büchi, …)
  - Magasabb szintű formalizmusok leképezhetők
    - UML állapottérkép
    - SCADE Safe Statechart
    - Simulink Stateflow
- Gráfelméleti algoritmusok
  - Algoritmus létezik sokféle tesztelési feladathoz
  - Optimális tesztek: Tipikusan NP-teljes algoritmusok ☹

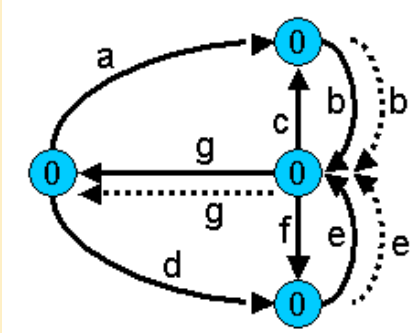
Gráfelméleti algoritmus átmenet fedéshez



- 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:
  - 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





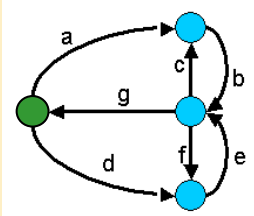
Eredeti gráf
hely polaritásokkal

Duplikált élekkel
kiegészített gráf (Euler-gráf)

Bejárási szekvencia (Euler-kör):

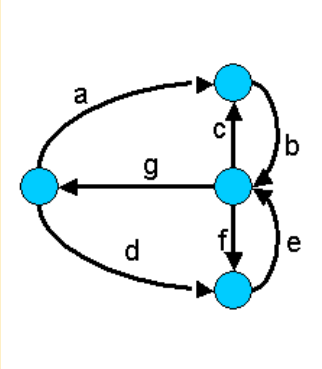
a b c b f e g d e g

Gráfelméleti algoritmus átmenet kombináció fedéshez

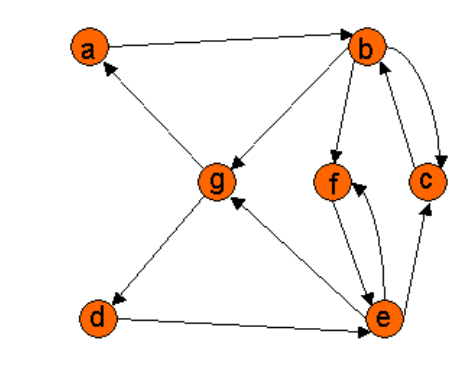


- Problémák megfeleltetése
  - Tesztelési probléma: Átmenet kombinációk fedése
    - Minden egymás után lehetséges n hosszúságú átmenet sorozat fedése a teszt szekvenciával
    - A teszt szekvencia vigyen vissza a kezdeti állapotba
    - Legegyszerűbb eset: Minden lehetséges átmenet-pár fedése
  - Gráfelméleti probléma: „Bankrabló” probléma
    - (Legrövidebb) élszekvencia, amiben minden lehetséges n hosszú élsorozat előfordul (legegyszerűbb eset: n=2)
- Megoldás (de Bruijn algoritmus) alapötlete:
  - Duális gráf megkezdése: Az eredeti gráf éleiből helyek lesznek
  - Az eredeti gráfban létező élpárok esetén él behúzása a duális gráfba az élek által adott 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

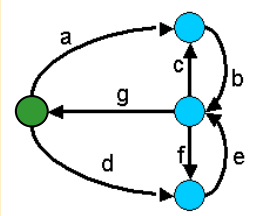
Bejárási szekvencia volt az élek fedéséhez:

a b c b f e g d e g Pl. a b, g élpár nincs lefedve!

Bejárási szekvencia a duális gráf alapján élpárok fedéséhez:

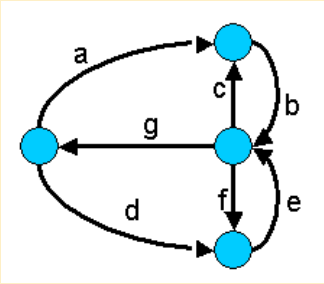
a b c b f e c b g d e f e g

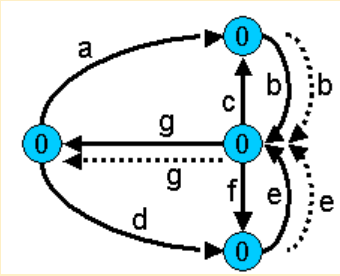
Gráfelméleti algoritmus konkurens átmenet fedéshez



- 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: Egy bemenettel bárhonnan kezdőállapotba vihető a rendszer
  - Gráfelméleti probléma: „Utcaseprő brigád” probléma
- Megoldás: Heurisztika (nincs 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 határral lehet próbálkozni

Egy példa átmenet fedéshez





Bejárási szekvencia (Euler-kör):

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):

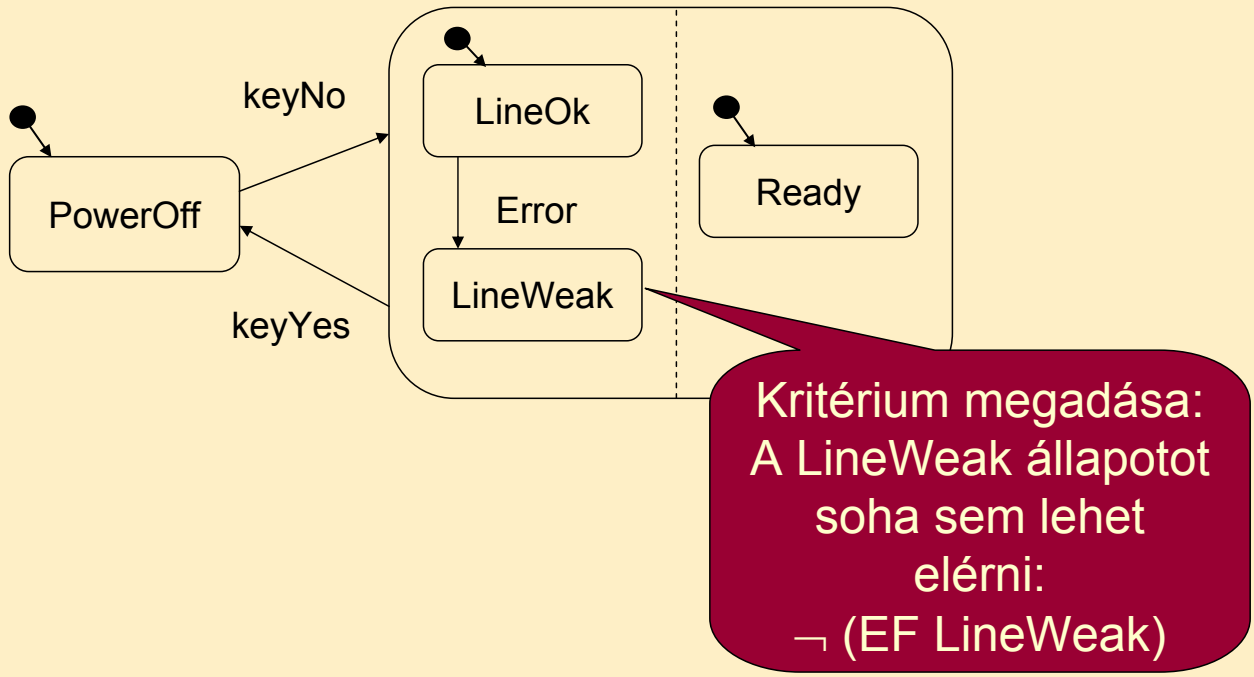
- Tesztelő 1: a b c b g (5 időegység kell)
- Tesztelő 2: d e f e g

Tartalomjegyzék

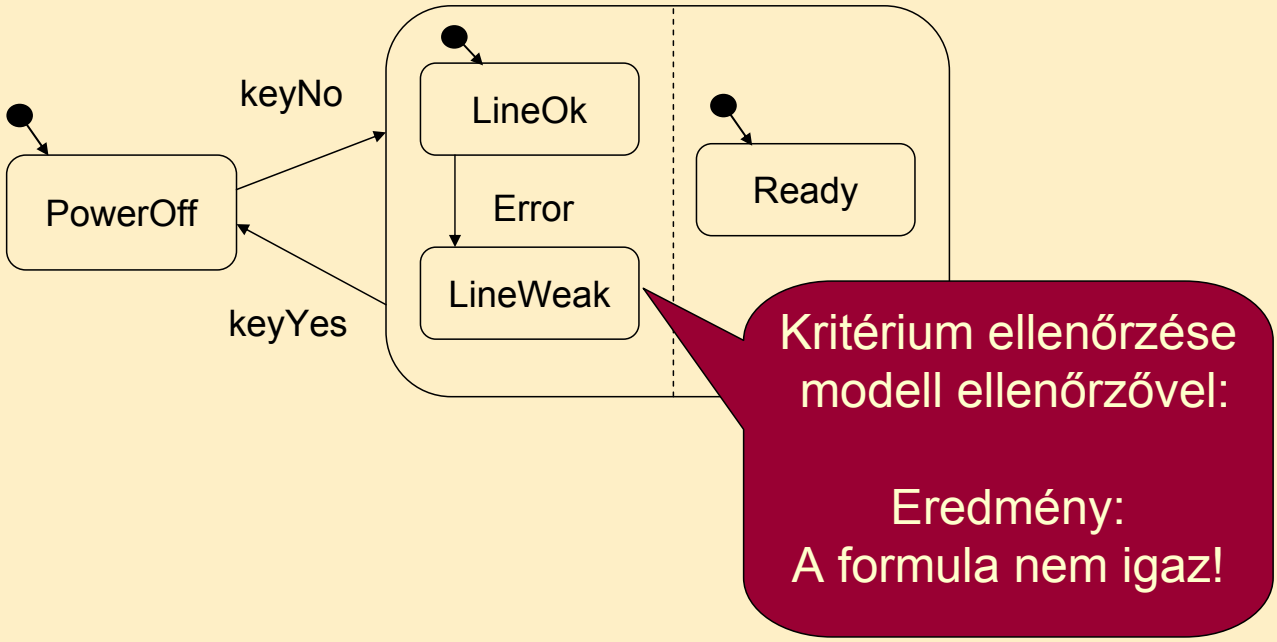
Alapötlet

- Tipikus tesztelési kritériumok:
  - Állapotok, átmenetek lefedése
  - Változó definiálások és felhasználások lefedése
  - Be- és kimenő átmenet-párok lefedése egy-egy állapothoz
- 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!

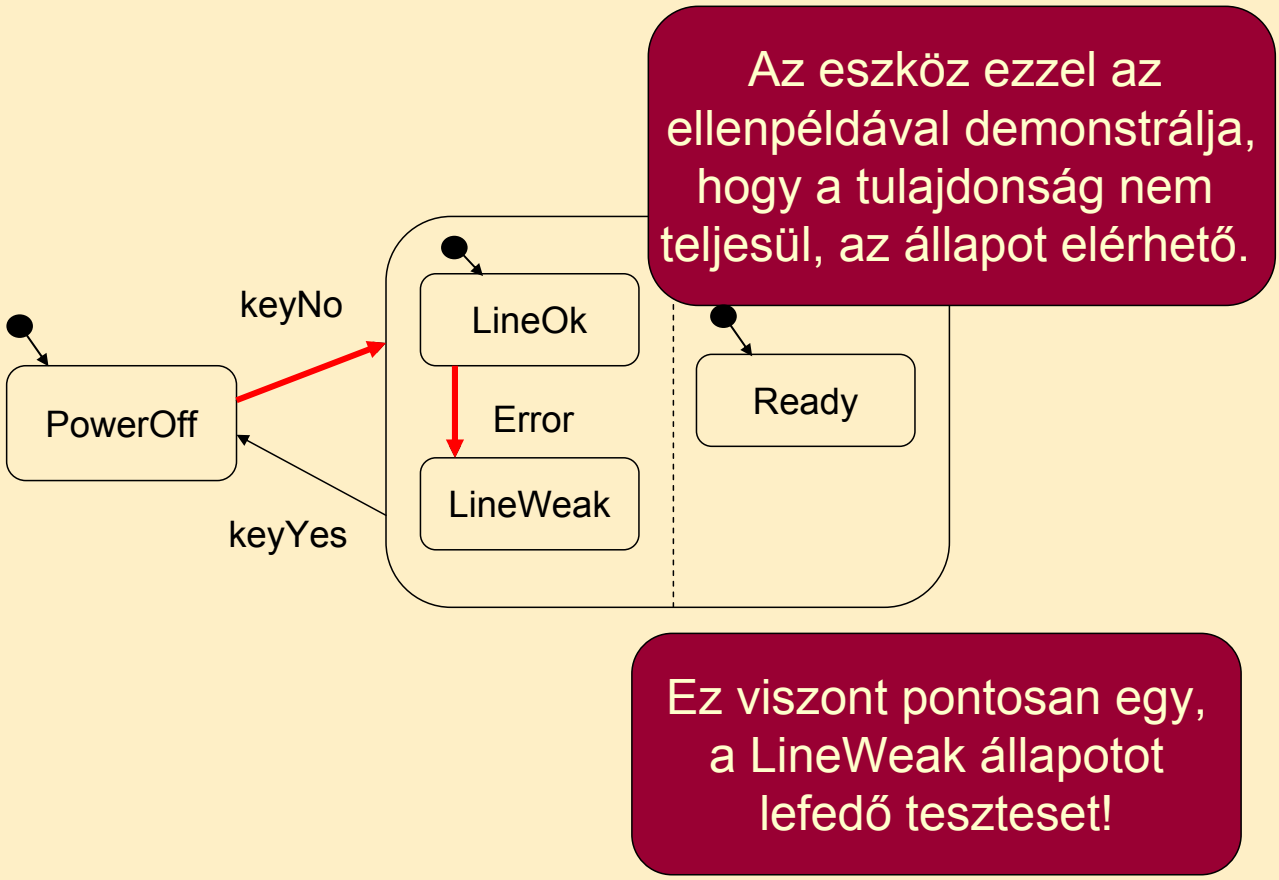
A modellellenőrző használata tesztgenerálásra



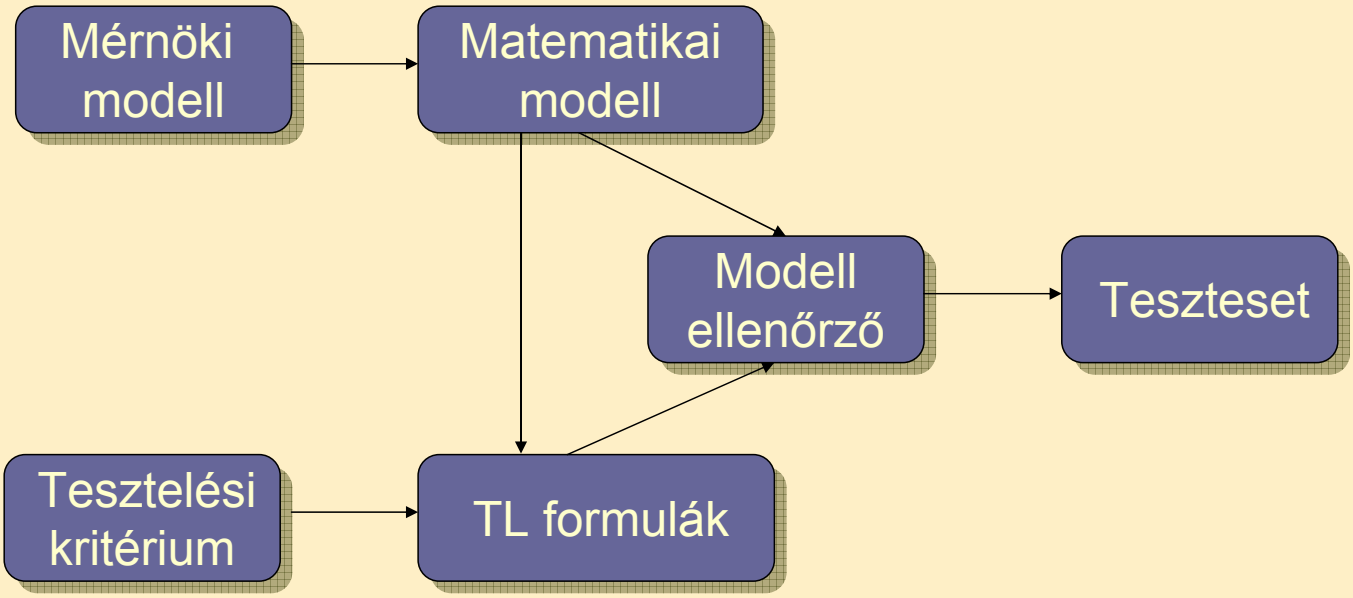
A modellellenőrző használata tesztgenerálásra



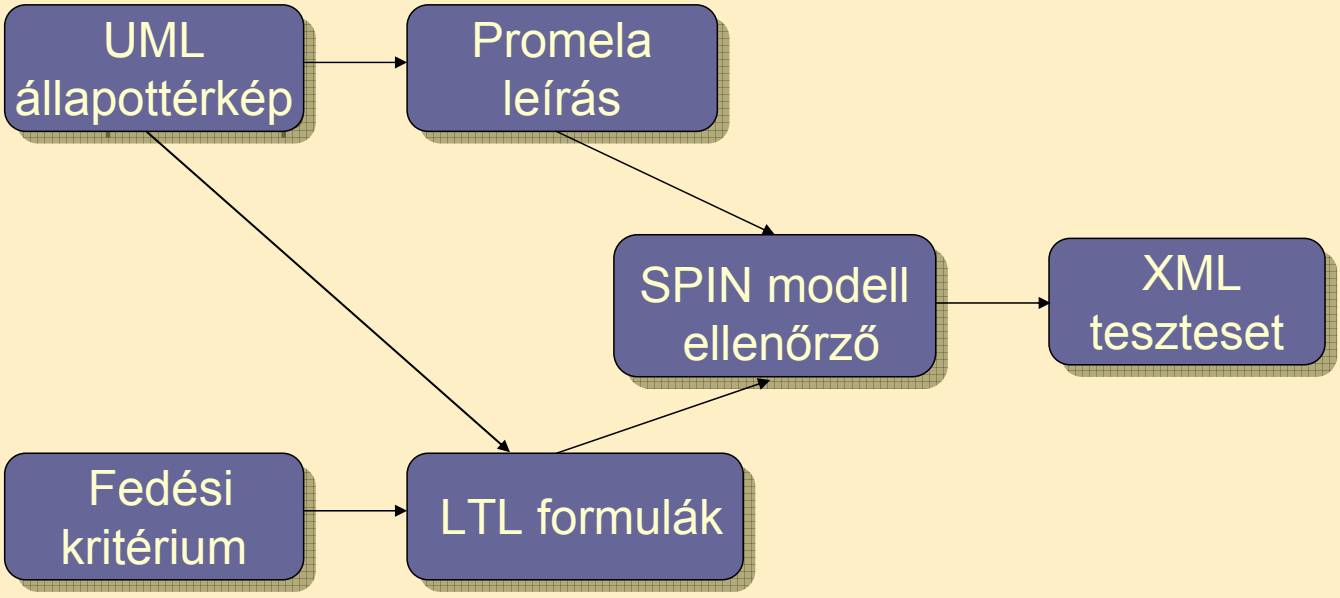
A modellellenőrző használata tesztgenerálásra



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.

- Állapothalmazok ($\rightarrow$ predikátumok diszjunkcióval):
  - d(v): minden def(v)
  - u(v): minden c-use vagy p-use
  - im-u(v): minden implicit use
- Makrók:
  - in(s): s állapotban való tartózkodás (állapotváltozókkal)
  - f(t): t átmenet tüzelése (állapot és következő állapot)
  - exit: megfelelő stabil állapot új teszthez

Vezérlés alapú fedettségi kritériumok

- Állapotfedés:

  $\{\neg EF\ (in(s) \wedge EF\ exit) \mid s \text{ alapszintű állapot}\}$

Kritériumhalmaz!

- Gyenge átmenet fedés:

  $\{\neg EF\ (f(t) \wedge EF\ exit) \mid t \text{ átmenet}\}$

- Erős átmenet fedés:

  $\{\neg EF\ (f(t) \wedge EF\ exit) \mid t \text{ átmenet}\} \cup$
  $\{\neg EF\ (f(it) \wedge EF\ exit) \mid it \text{ implicit átmenet}\}$

Erős fedés: Implicit átmenetek (helyben maradás) is tesztelve

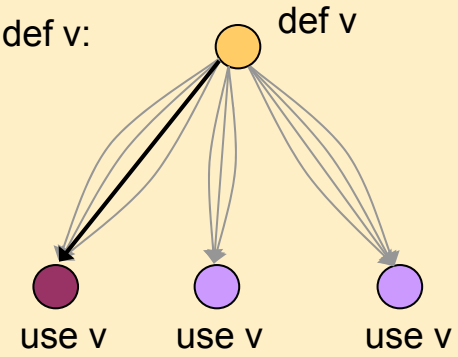
Adatfolyam alapú fedettségi kritériumok (ismétlés)

- All-defs:

forall v, forall def v:

egy def-clear útvonal:

egy use v:

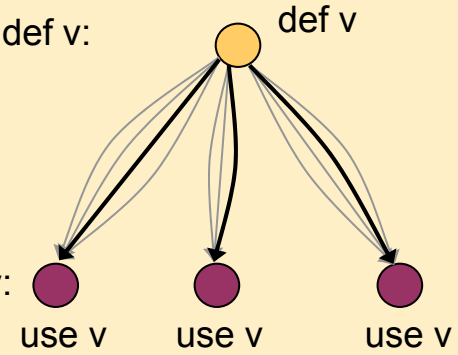


- All-uses:

forall v, forall def v:

egy def-clear útvonal:

minden use v:



Adatfolyam alapú fedettségi kritériumok

- Gyenge <u>all-defs fedés</u>:

Egy def-clear útvonal tesztelve minden def(v) és <u>egy</u> use(v) között

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

- Gyenge <u>all-uses fedés</u>:

Egy def-clear útvonal tesztelve minden def(v) és <u>minden</u> use(v) között

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

Implicit változó használat (~ helyben maradás feltétele) is tesztelve

- Erős <u>all-defs fedés</u>:

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

- Erős <u>all-uses fedés</u>:

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

Korlátozások

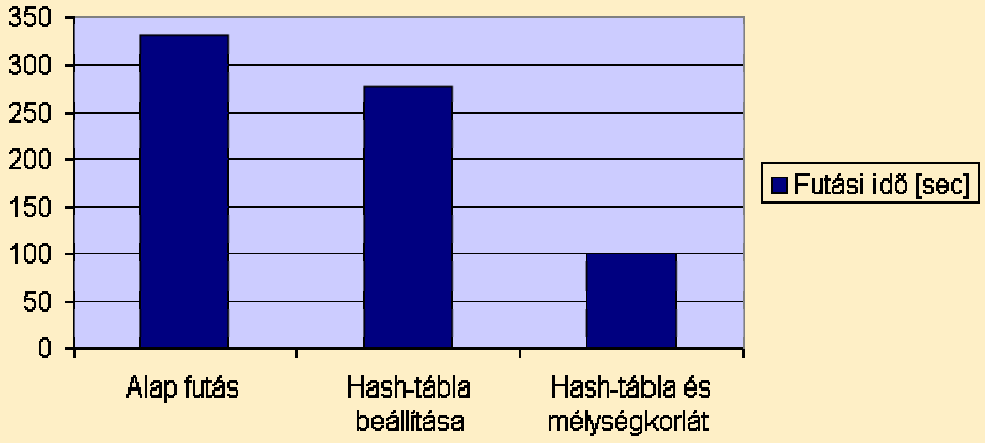
- Modellellenőrző jellegzetességei:
  - Csak egy ellenpéldát generál
  - Így nem generálhatók tesztek olyan fedettségi kritériumokhoz, ahol minden ellenpéldára szükség van
    - Pl. all-du-paths kritérium (minden def-clear útvonal egy def-use párhoz)
- Absztrakt teszt eset adódik
  - Csak a bemeneti szekvencia kötött
  - Elvárt kimeneteket meg kell határozni (szimulációval)
- Nemdeterminisztikus modellek:
  - Egy bemeneti szekvenciához több bejárás (cél állapot)
  - Teszt végrehajtásakor figyelembe kell venni

Optimalizáció

- Modellellenőrző feladata:
  - Állapottér hatékony bejárása: Gyorsan, kis tárigénnyel
- A tesztgenerálás célja:
  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 fv. az állapottároláshoz)
    - Bizonyos állapotokat nem jár be a keresés során
    - De ha talál ellenpéldát, az valós teszt lesz

„Mobiltelefon” példa: Teljes állapotfedésű tesztek

- Példa: Mobiltelefon vezérlését leíró állapottérkép
- 10 állapot, 21 átmenet



Tesztgenerálási eredmények

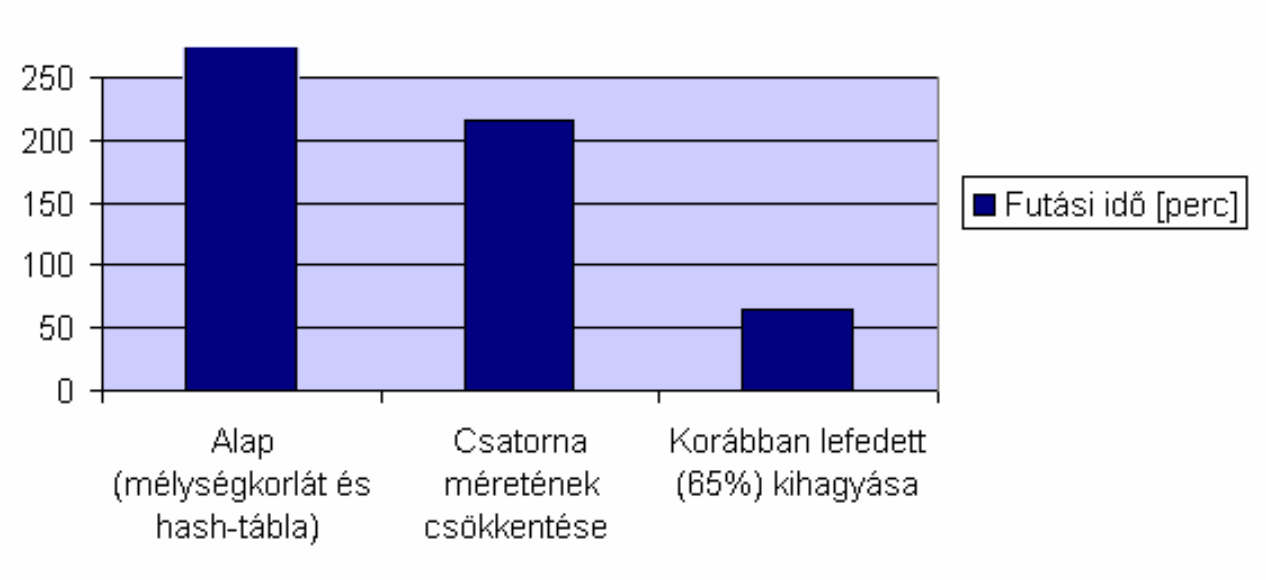
Options (compile or run-time)	Time required for test generation	Length of the test sequences	Longest test sequence
-i	22m 32.46s	17	3
-dBFS	11m 48.83s	17	3
-i -m1000	4m 47.23s	17	3
-l	2m 48.78s	25	6
default	2m 04.86s	385	94
-l -m1000	1m 46.64s	22	4
-m1000	1m 25.48s	97	16
-m200 –w24	46.7s	17	3

Paraméterek:
- -i iteratív, -l közelítő iteratív
- -dBFS szélességi keresés
- -m mélységi keresés korlátja
- -w hash tábla korlátja

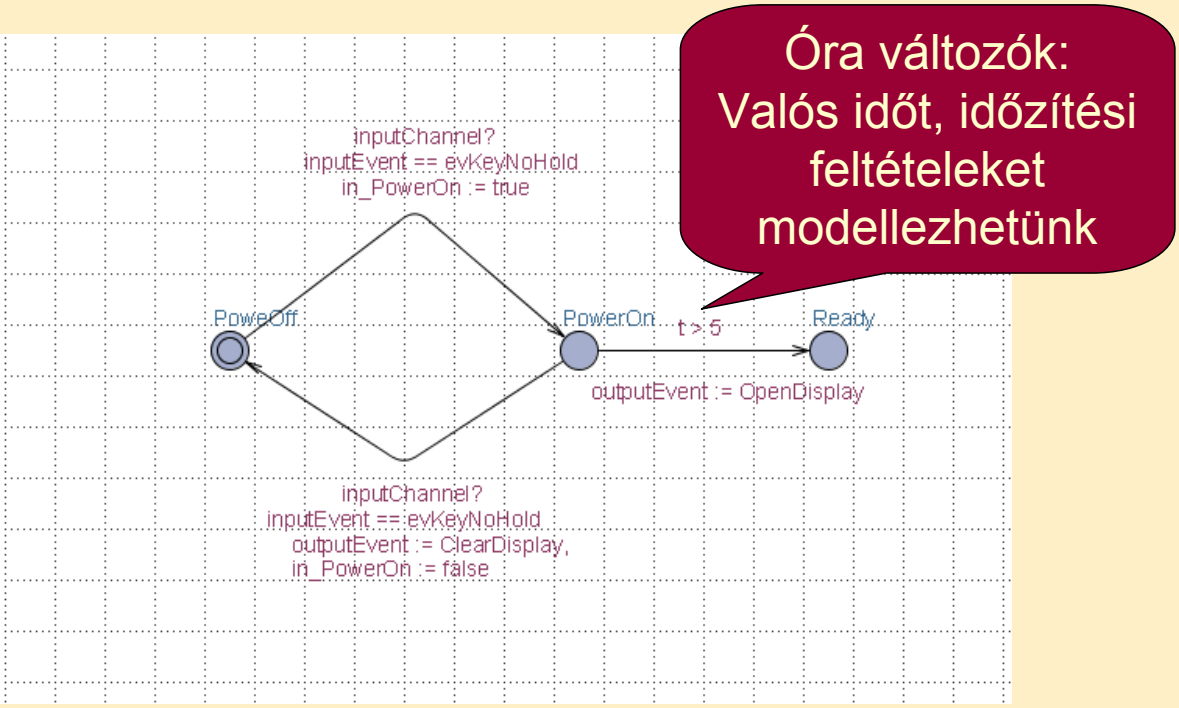
„Bitszinkronizációs protokoll” példa

- Példa: Bitek szinkronizálása egy elosztott rendszerben
  - 5 objektum, 31 állapot, 174 átmenet
  - 2e+08 bejárandó állapot
- Más technikák is kellenek:
  - Erősen tömörítő állapottárolás alkalmazása (bitstate hashing)
  - Szűkítések a modellben: csatorna méret csökkentés
  - 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

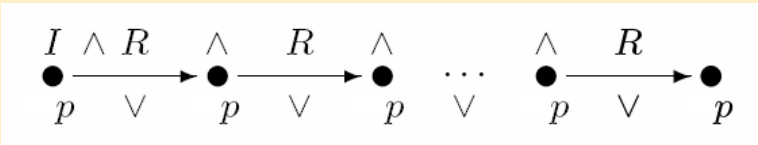
Transitions:
input.sending->input.sendInput { 1, inputChannel!, 1 }
mobile2.CallWait->mobile2.VoiceMail { inputEvent == evKeyYes && t > 5 &&
in_PowerOn, inputChannel?, 1 }

Tartalomjegyzék

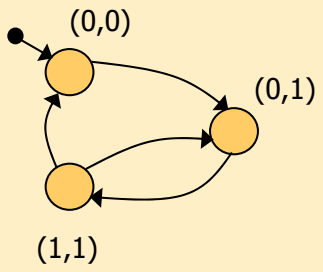
- Motiváció
  - Modellek szerepe a tesztelésben
  - Modell alapú tesztgenerálás
- Tesztgenerálás fedettségi kritériumokhoz
  - Direkt algoritmusok
  - Modellellenőrzők használata
  - Tesztgenerálás korlátos modellellenőrzéssel
- Tesztgenerálás hibamodellek alapján
  - Modell mutációk
  - Ekvivalencia 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 „széthajtogatás”: $R(s_i, s_{i+1})$
- A logikai függvény felírása: Konjunkció
  - Kezdőállapotból indul: Az I(s) predikátum az első állapotra
  - Széthajtogatott átmenetek: Az $R(s_i, s_{i+1})$ reláció alkalmazása
  - Elérendő állapot: A p(s) predikátum valahol fennáll



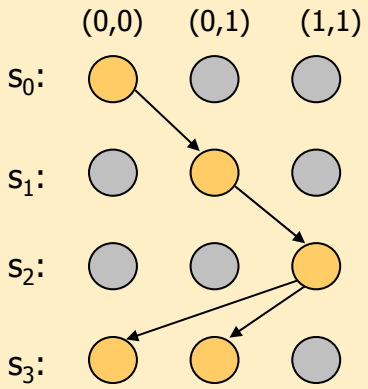
Példa: A modell leképzése logikai függvénybe



Kezdőállapot predikátum:
$I(x,y) = (\neg x \wedge \neg y)$

Állapotátmeneti reláció:

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



3 lépéses kihajtogatás a kezdőállapotból:

$$
\begin{aligned}
& I(x_0,y_0) \wedge \\
& R(x_0,y_0,x_1,y_1) \wedge \\
& R(x_1,y_1,x_2,y_2) \wedge \\
& R(x_2,y_2,x_3,y_3)
\end{aligned}
$$

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, …

$$\underbrace{\exists s_0, s_1, \ldots, s_k}_{\text{Állapot-szekvencia}} : \underbrace{I(s_0) \wedge \bigwedge_{i=0}^{k-1} R(s_i, s_{i+1})}_{\text{Modell széthajtogatás}} \wedge \underbrace{TG}_{\text{Teszt cél}}$$

- 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

Hibamodellek 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 tartalmaznak, és generáljunk ezek kimutatására teszteket
  - Ezek várhatóan bonyolultabb hibákhoz is jobbak a véletlen teszteknél
- Tipikus mutációk:
  - Aritmetikai operátorok felcserélése feltételekben
  - Állapotátmenetek megváltoztatása
  - Akciók (műveletek, üzenetek) sorrendjének megváltoztatása
  - Akciók kihagyása, …

Tesztgenerálás hibamodell 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?
    - Több kimenet, más bemenetekre való reakció, …
  - Kihagyás (elmaradt kimenet) megengedett-e?
- Szokásos megoldások
  - Biztonságkritikus rendszer:
    - Szigorúan a specifikáció szerint
    - Teljes specifikáció szükséges
  - „Hétköznapi” rendszer:
    - Beférjen a specifikáció keretei közé

k-ekvivalencia a teszteléshez

- Alkalmazás: Fekete doboz teszteléshez
  - 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

$$\underbrace{\bigwedge_{i=0}^{k}(\mathrm{in}(s_i) = \mathrm{in}(s'_i))}_{\text{Egyező bemenetek}} \wedge \underbrace{I(s_0) \wedge \bigwedge_{i=0}^{k-1} R(s_i, s_{i+1})}_{\text{Eredeti modell}} \wedge \underbrace{I'(s'_0) \wedge \bigwedge_{i=0}^{k-1} R'(s'_i, s'_{i+1})}_{\text{Mutáns modell}} \wedge \underbrace{\bigvee_{i=0}^{k}(\mathrm{out}(s_i) \neq \mathrm{out}(s'_i))}_{\text{Eltérő kimenet}}$$

- 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:
  - Megengedett, hogy azonos bemeneti szekvenciára a mutáns modell kimenetei részhalmazát képezik az eredeti modellben rögzített kimeneteknek (azaz „beleférnek” az eredeti modellbe)
    - Részleges viselkedés (kihagyás) megengedett, eltérő viselkedés nem
    - Többlet funkció megengedett az eredeti modellben nem rögzített bemeneti szekvenciára
  - A k-ekvivalenciánál megengedőbb konformancia reláció
- Definíció (ld. korábban):

  Minden, az eredeti modellben felvehető akciószekvenciára igaz:
  Az így elérhető állapotokban a mutáns által nyújtott kimeneti akciók részhalmazát képezik az eredeti modell által nyújtott kimeneti akcióknak
- Tesztek generálhatók SAT megoldóval
  - Bonyolultabb a részhalmaz reláció vizsgálata miatt (itt nem írjuk fel)

IOCO alapú tesztgenerálás jellegzetességei

- Teszt eset:
  - Egy olyan akciószekvencia, ami különbséget tesz az eredeti és a mutáns modell között: kimutatja, hogy nem IOCO ekvivalensek
  - A SAT megoldó miatt korlátos hosszúságú teszt eset
- Jellegzetességek:
  - Tartalmazza bemeneti és a kimeneti sorozatot is (nem kell utólagos bejárás)
  - Nemdeterminisztikus modell esetén csak teszt célként fogható fel
  - A δ akció detektálása a teszt végrehajtás során mint timeout jelenik meg
    - A timeout elfogadható a specifikációban δ -val jelölt állapotokban (ez az elvárt viselkedés)

Tartalomjegyzék

Példák automatikus tesztgeneráló eszközökre I.

- Tesztelés modell ellenőrzővel
  - FSHELL: C programokhoz
    - CBMC (korlátos modellellenőrző) generálja az ellenpéldát mint teszt szekvenciát strukturális tesztelési kritériumokhoz
  - BLAST:
    - Ellenpélda generálás adott teszt célhoz: Absztrakt teszt eset
    - Szimbolikus végrehajtás: Teszt adatok generálása
  - UPPAAL CoVer, TRON:
    - Valósidejű rendszerek modellezése: Időzített automaták
    - UPPAAL modell ellenőrző 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
  - STG: LOTOS specifikációs nyelv
  - AGATHA: UML, SDL, STATEMATE modellek
    - Kényszerkielégítési probléma megoldása (változók kezelése): útvonal bejárási feltételek generálása
  - Autolink: SDL és MSC specifikáció alapján
  - TDE/UML: Fedettségi kritériumok és kényszerek megadhatók
  - Conformiq: UML (állapottérkép) modellekhez
  - T-Vec, DesignVerifier, Reactis, AutoFocus: Simulink modellekhez

Összefoglalás

- Modell alapú tesztgenerálás
  - Fedési kritériumok teljesítéséhez
    - Vezérlés-orientált: állapotok, átmenetek fedése
    - Adatfolyam-orientált: def-use fedéshez
  - Specifikációval nem konform viselkedés (mutáció) kimutatásához
    - k-ekvivalencia reláció szerint
    - IOCO reláció szerint
- Eszközök
  - Direkt (gráfelméleti) algoritmusok
  - Modellellenőrzők: Ellenpélda generálása
  - SAT megoldók: Helyettesítési értékek generálása
  - Planner algoritmusok: Cél-orientált bejárás generálása
  - Kényszerkielégítési problémaként való megoldás