Modellek ekvivalenciájának ellenőrzése

Majzik István
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Motiváció: Relációk modellek között

- Megfelelőség (ekvivalencia) modellek között:

  Referencia modell $\leftrightarrow$ Vizsgált (módosított) modell

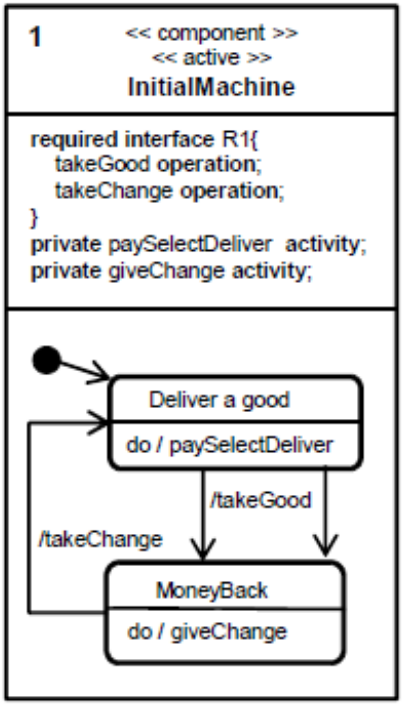
  Specifikáció (absztrakt) $\leftrightarrow$ Megvalósítás (konkrét, részletes)

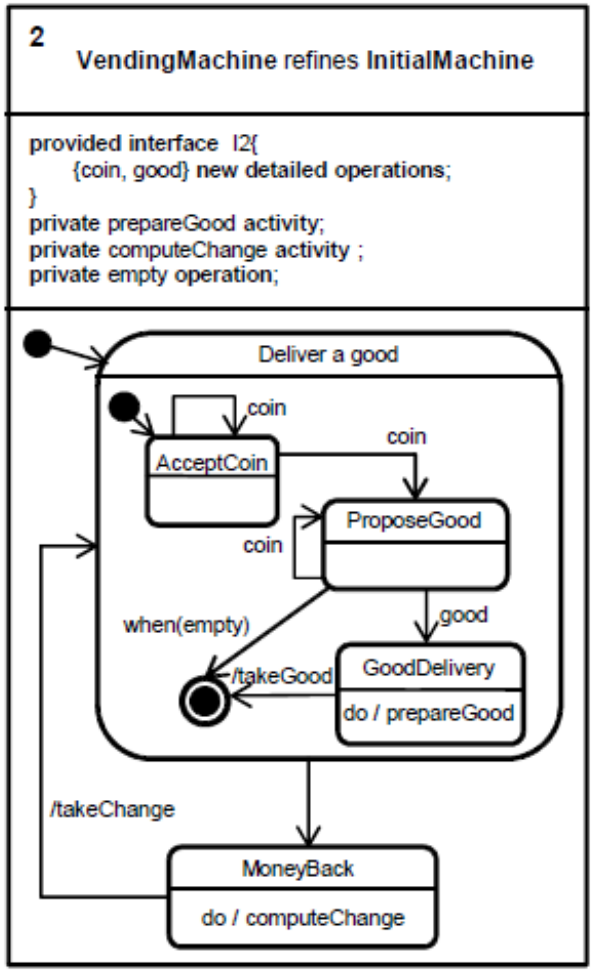
  Elvárt viselkedés $\leftrightarrow$ Nyújtott viselkedés (pl. protokoll)

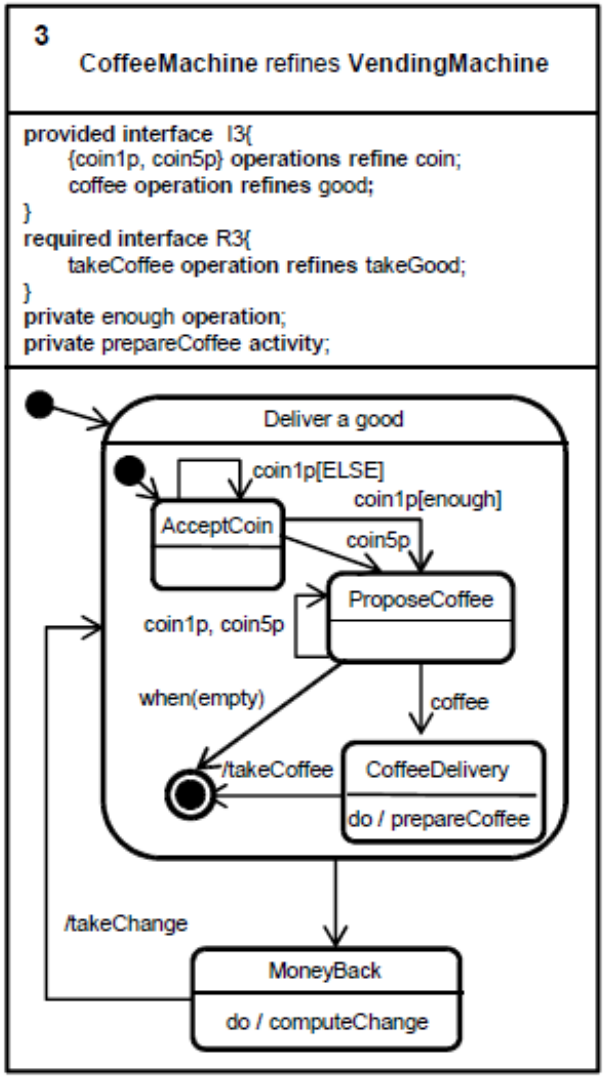
  Ideális rendszer $\leftrightarrow$ Hibatűrő rendszer adott hibák esetén

- Finomítás (rendezés) modellek között:
  - Referencia viselkedés megtartása, meghatározott bővítésekkel
  - Lehetséges nemdeterminizmus csökkentése
  - Lehetséges holtpontok számának csökkentése

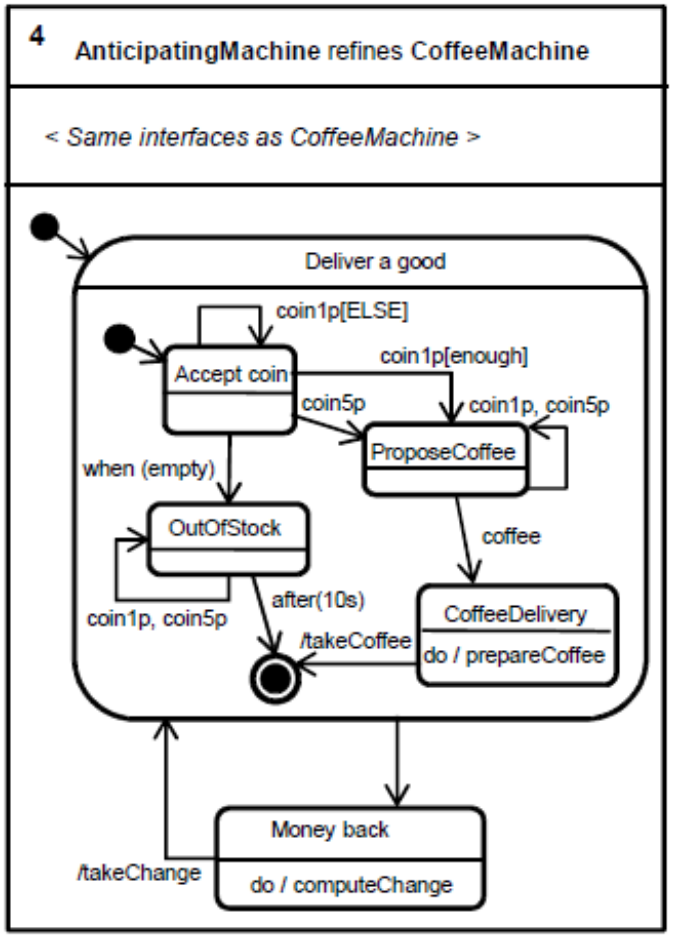
Példa: Állapottérkép modellek finomítása

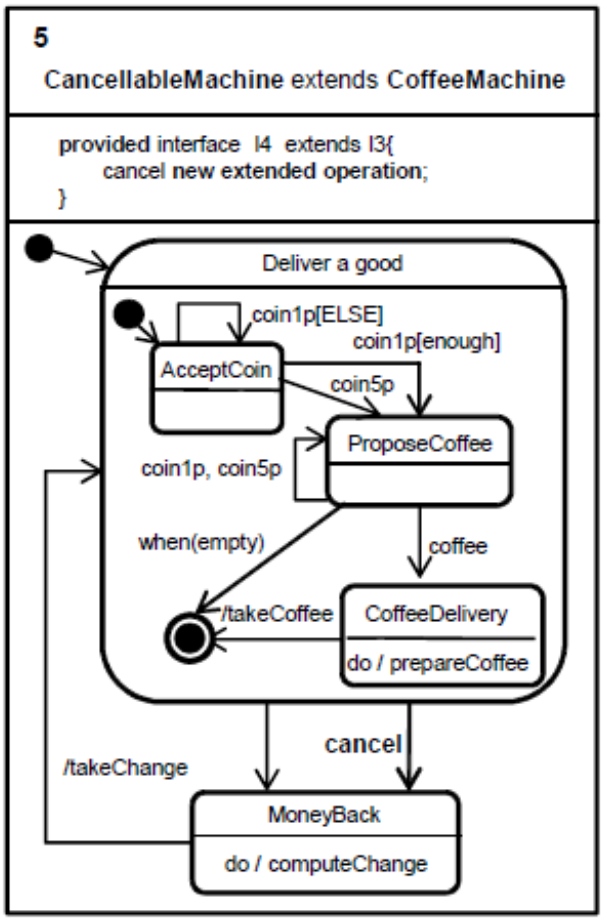




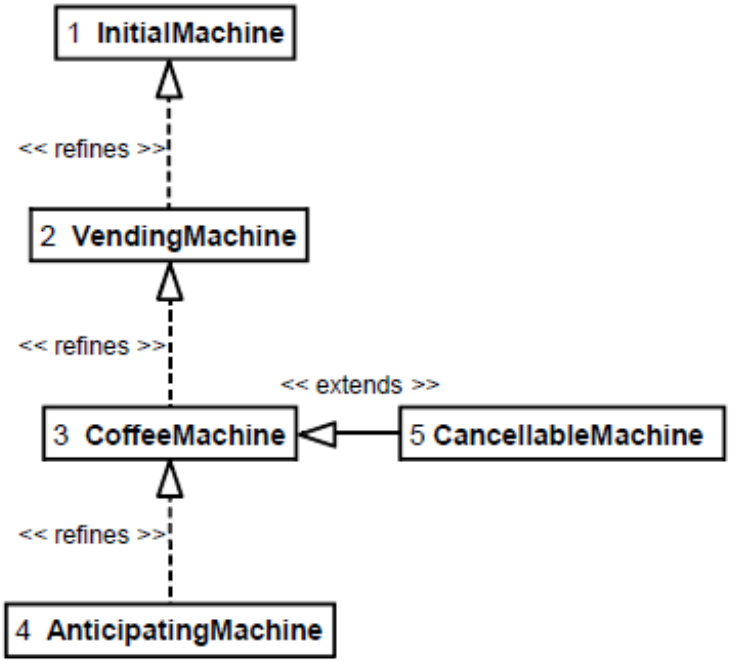


Példa: Állapottérkép modellek finomítása (folytatás)





Példa: Mit szeretnénk?
Relációkat ellenőrizni az állapottérkép modelleken

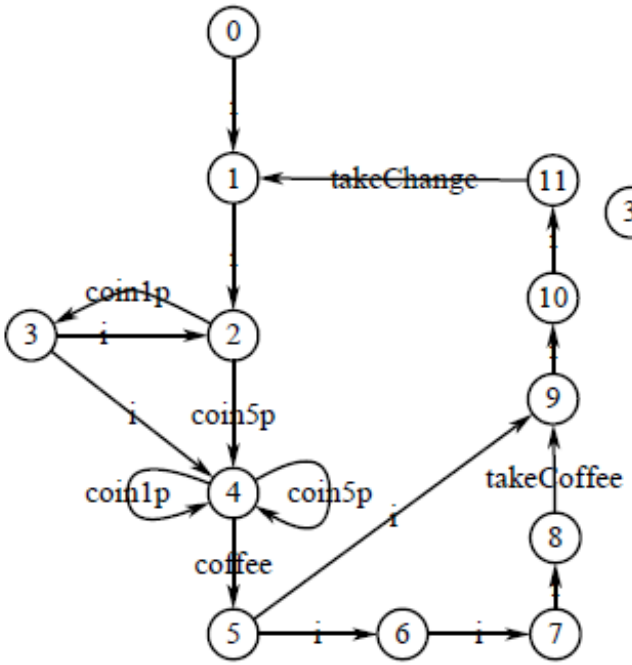


Példa: Mit várunk egy finomítás relációtól?

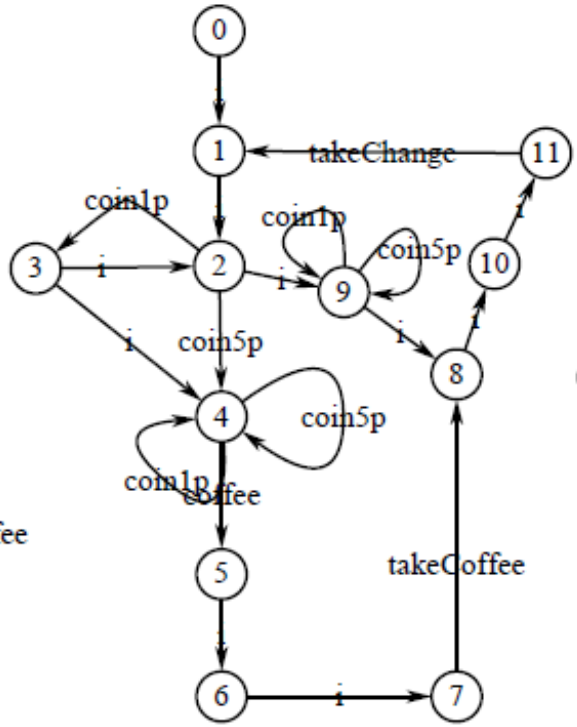
- Reflexív és tranzitív reláció
- Nem szimmetrikus reláció
- Élő tulajdonság megtartása: A finomított modell tudja nyújtani azt az viselkedést, amit az eredeti modellnek is tudnia kellett
  - Méltányosság (fairness) feltételezés: Az élő tulajdonság megtartása méltányos viselkedés mellett történik (azaz választás esetén minden viselkedésnek van esélye)
- Komponálhatóság:
  - Egymás utáni finomítások finomítást eredményeznek
  - Finomítás és kiterjesztés együtt kiterjesztést eredményez
- …

Pontos definíció szükséges!

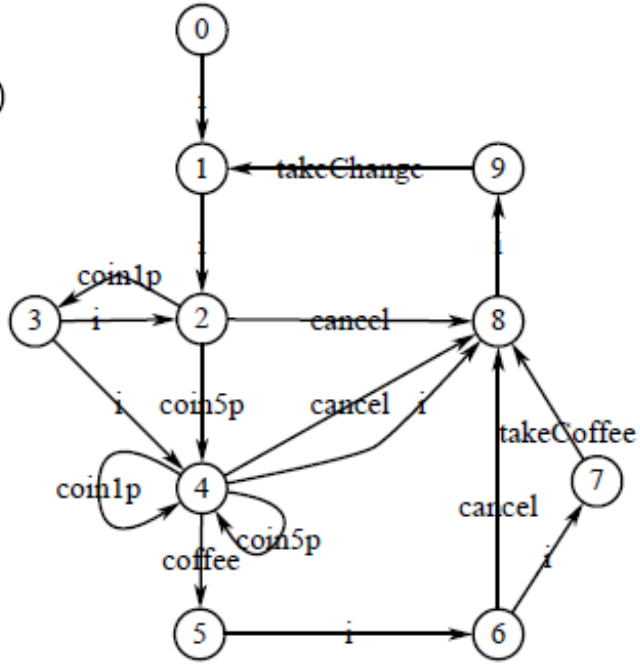
Példa: A relációk értelmezhetők az állapottérkép modellekből származó LTS-eken



a. LTS_3: CoffeeMachine



b. LTS_4: AnticipatingMachine



c. LTS_5: CancellableMachine

Relációk csoportosítása

- Ekvivalencia reláció (equivalence) =
  - Reflexív, tranzitív, szimmetrikus

  Kongruencia reláció (congruence)
  - Ha T1=T2, akkor minden C[ ] környezetre C[T1]=C[T2]
  - Azonos kiterjesztés megőrzi az ekvivalenciát
  - Nyelvfüggő: C[ ] beillesztés hogyan történik

- Finomítási (rendezési) reláció (preorder) ≤
  - Reflexív, tranzitív, antiszimmetrikus

  Prekongruencia reláció (precongruence) ≤
  - Ha T1≤T2, akkor minden C[ ] környezetre C[T1] ≤ C[T2]
  - A beágyazás megőrzi a relációt

Formalizmusok

- Ekvivalencia és finomítási relációk modellje: LTS (Labeled Transition System)

$$LTS = (S, Act, \rightarrow)$$

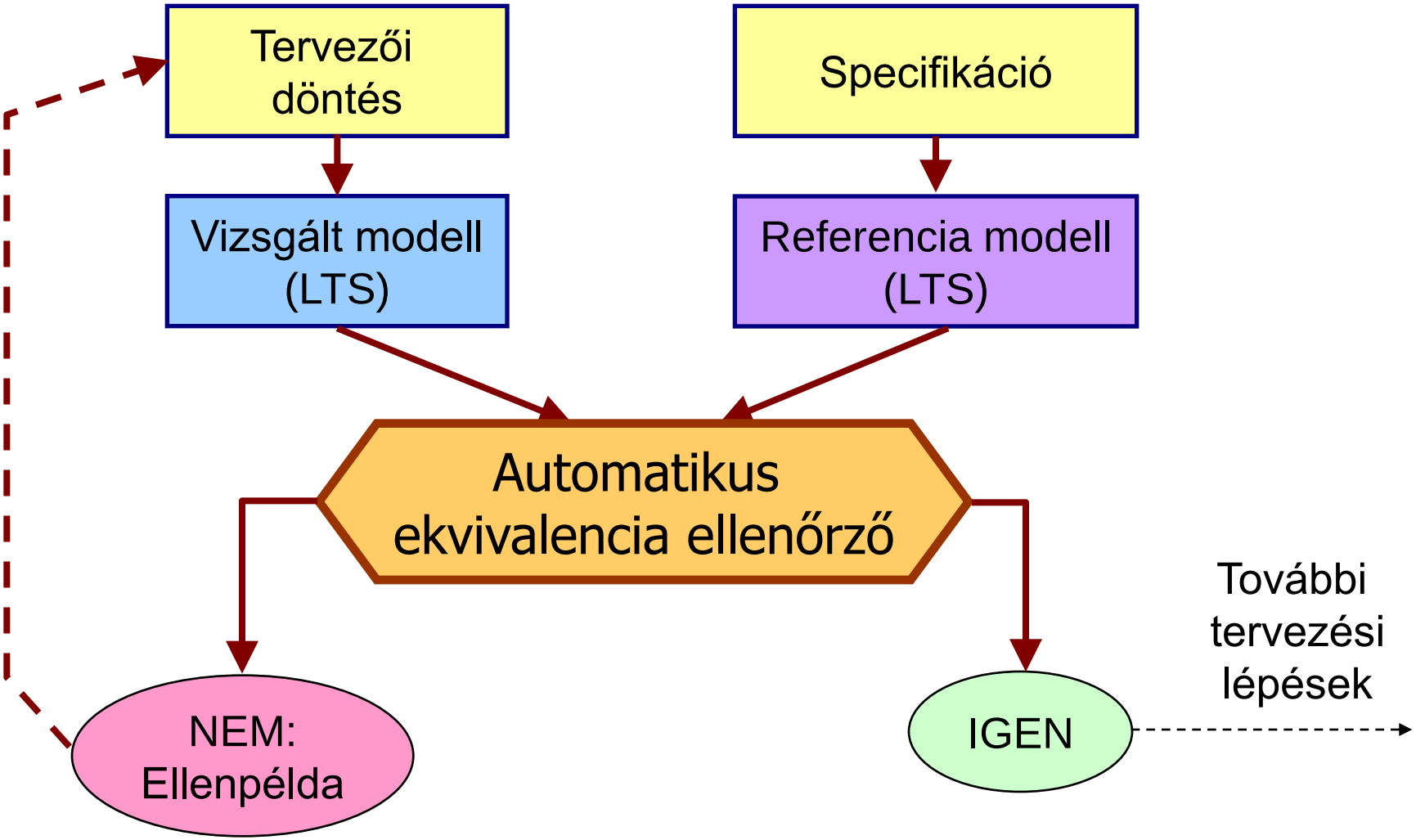
S az állapotok halmaza

Act az akciók halmaza

$\rightarrow \subseteq S \times Act \times S$ az állapotátmeneti reláció

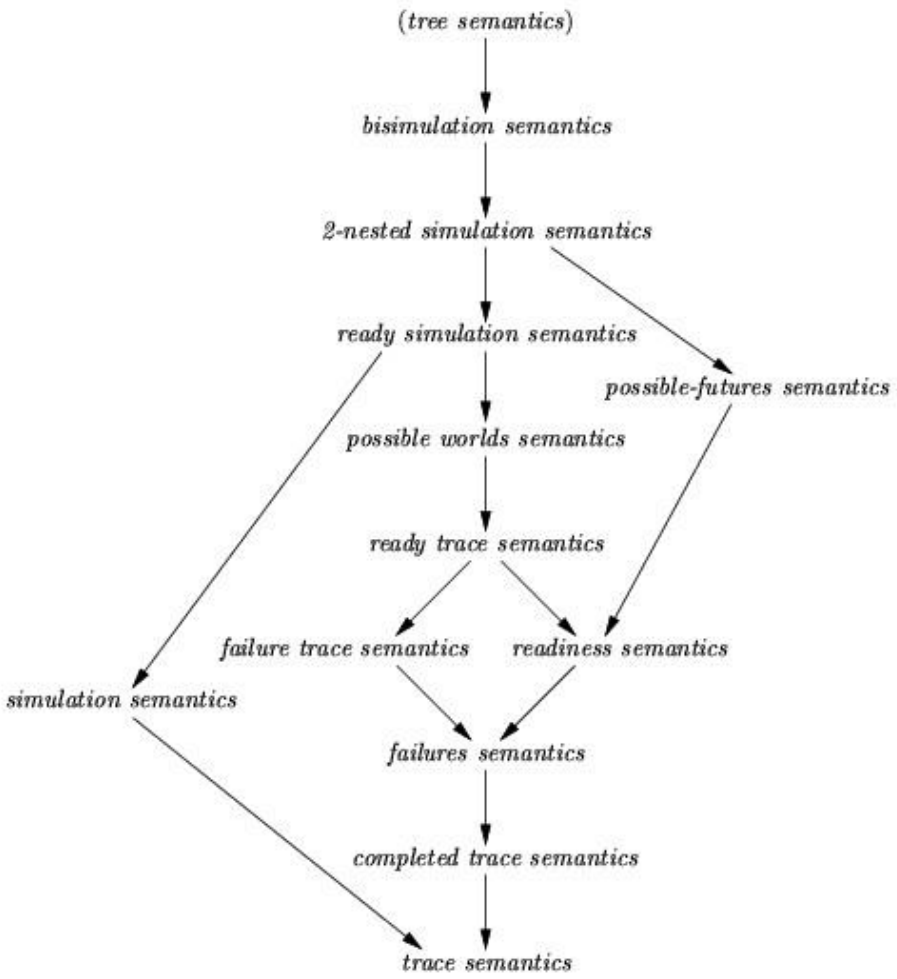
- LTS-ek magasabb rendű formalizmusokból (műveleti szemantikával) származhatnak
  - Processz algebra, Petri-háló, állapottérkép, …

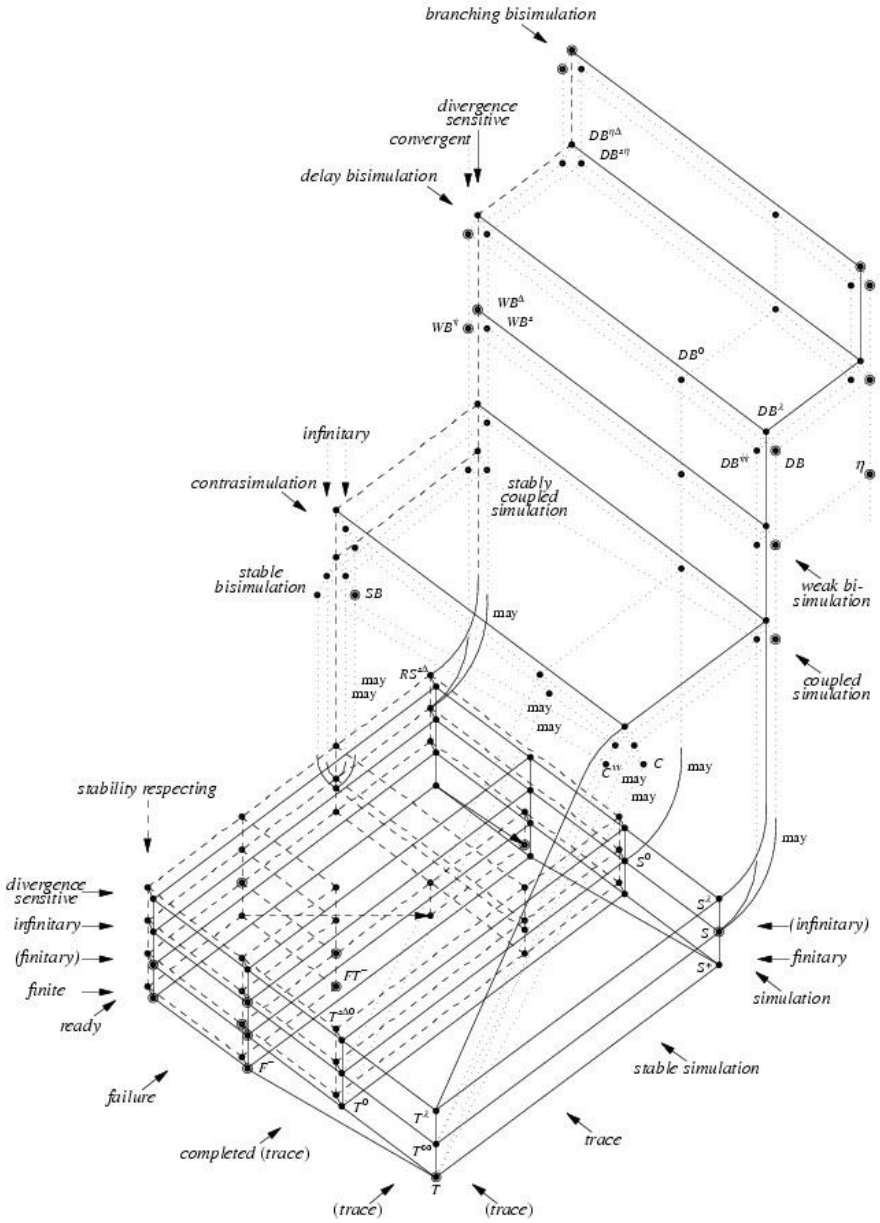
Ekvivalencia ellenőrzés



Relációk: Miért van ennyiféle?

Relációk hierarchiája:

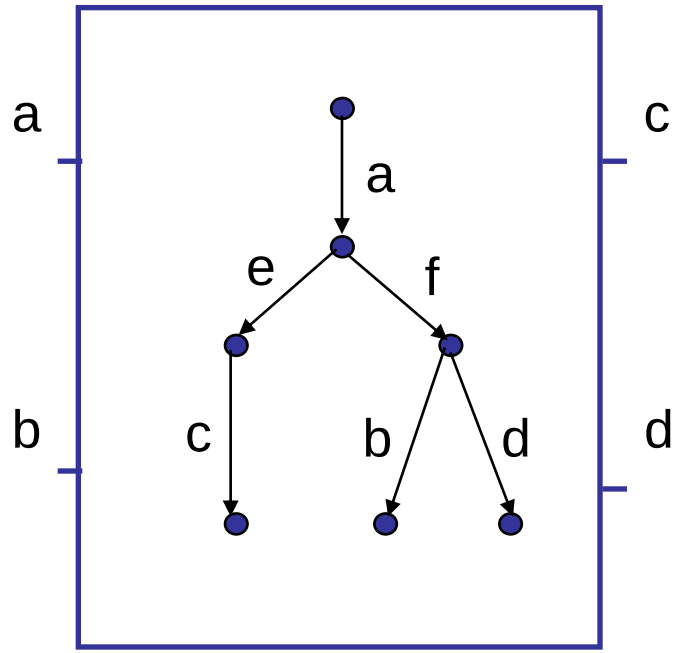


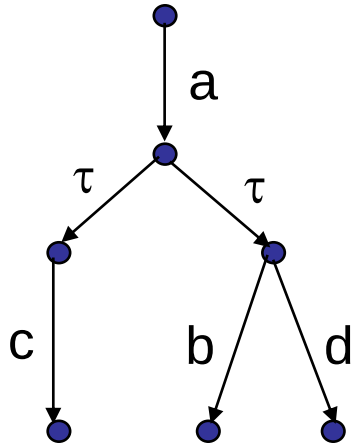


Befolyásoló tulajdonságok

- Az akciók megfigyelhetősége:
  - Megfigyelhető akciók: A vizsgált komponens (modul) interfészén megjelenő, a környezet számára releváns interakció
    - Pl. metódus hívása, hívás kiszolgálása; üzenet küldése, fogadása
  - Nem megfigyelhető (belső) akciók: Az interfészen nem megjelenő, vagy a környezet számára közvetlenül nem releváns viselkedés
    - Pl. belső vagy figyelmen kívül hagyható hívások, üzenetek
    - *Hatása* észlelhető a rákövetkező akciókon keresztül
    - Jelölése: i, vagy τ
- Nemdeterminizmus:
  - Egy állapotból több, azonosan címkézett átmenet
    - „Image finite system”: ezek száma véges
  - Absztrakt modellekben szokásos, finomítás során eltűnik
- Konkurens modellek szemantikája:
  - Átlapolódás (interleaving)
  - Valódi konkurencia (true concurrency)

Belső akciók (példa)





Komponens
belső viselkedés

Megfigyelhető
viselkedés

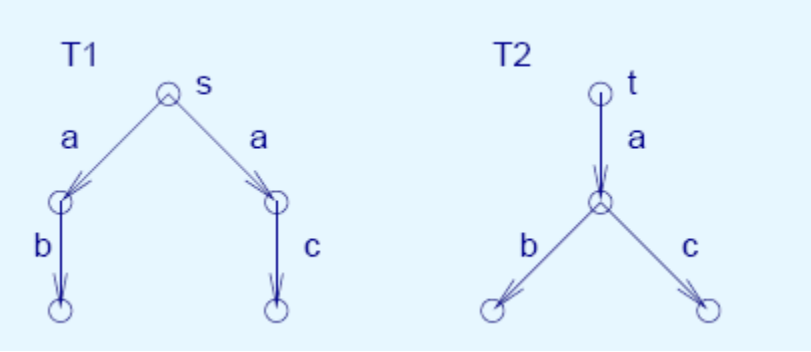
„Tesztelés” és „holtpont” (deadlock) értelmezése

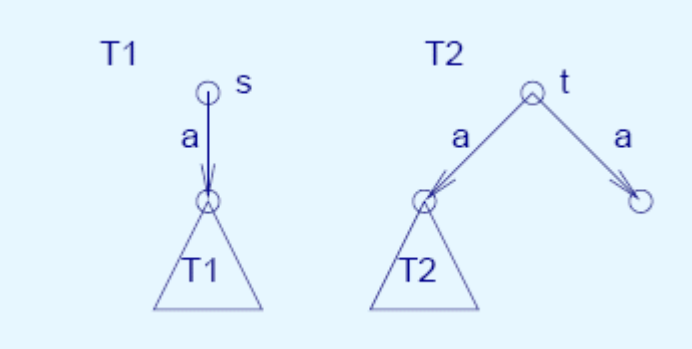
- „Tesztelés” értelmezése LTS-eken:
  - Rendszer mint fekete doboz, interfésszel (portok)
  - Teszt lefutás: Interakció a környezettel: Szinkronizáció sorozat a portokon keresztül
    - Üzenet küldése és fogadása
    - Esemény kiváltása és annak feldolgozása
- „Holtpont” (deadlock) értelmezése:
  - A környezet egy interakciót indít, de arra a rendszer nem reagál (interakció nem jön létre)
    - Üzenet küldése és fogadása nem történik meg
    - Esemény feldolgozása nem történik meg
  - Teszt „hibázik”: A kívánt interakció nem lehetséges
  - Analógia: Zongora reteszelhető billentyűkkel
    - Sikeres teszt: Lejátszható dallam

Példák a holtpont értelmezésére

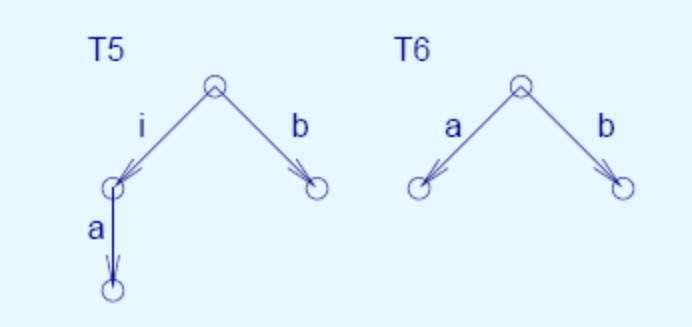
- T1 és T2 ekvivalenciája:

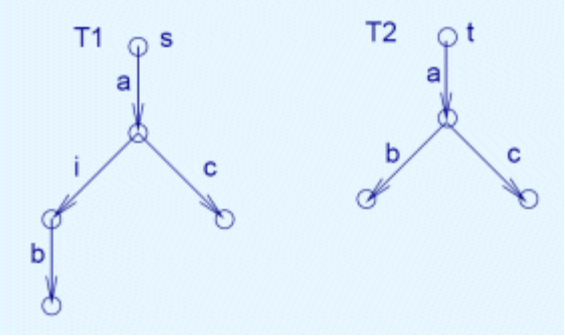
„Rekurzív” modell:





- Belső akció szerepe:





Ekvivalencia relációk

I. Trace ekvivalencia: Jelölések

- Minta: Automaták

$$A_1 = A_2 \quad \text{ha} \quad L(A_1) = L(A_2)$$

- LTS-ek esetén:
  - Minden állapot elfogadó állapot
  - „Nyelv”: Minden lehetséges akciószekvencia (trace)
- Jelölések:

$\alpha = a_1 a_2 a_3 a_4 \ldots a_n \in Act^*$ véges akciószekvencia (ε az üres)

$s \xrightarrow{\alpha} s'$ ha $\exists s_0 s_1 \ldots s_n$ állapotsorozat ahol $s_0 = s$, $s_n = s'$, $s_i \xrightarrow{a_{i+1}} s_{i+1}$

$\alpha(s)$ egy erős trace s-ből, ha $\exists s' : s \xrightarrow{\alpha} s'$

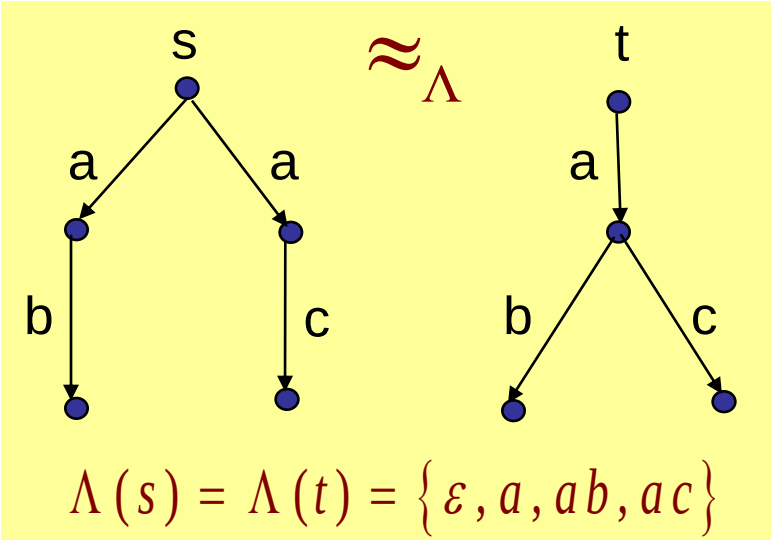
$\Lambda(s)$ legyen s erős trace-einek halmaza: $\Lambda(s) = \left\{ \alpha \mid \exists s' : s \xrightarrow{\alpha} s' \right\}$

I. Trace ekvivalencia: Definíció és példák

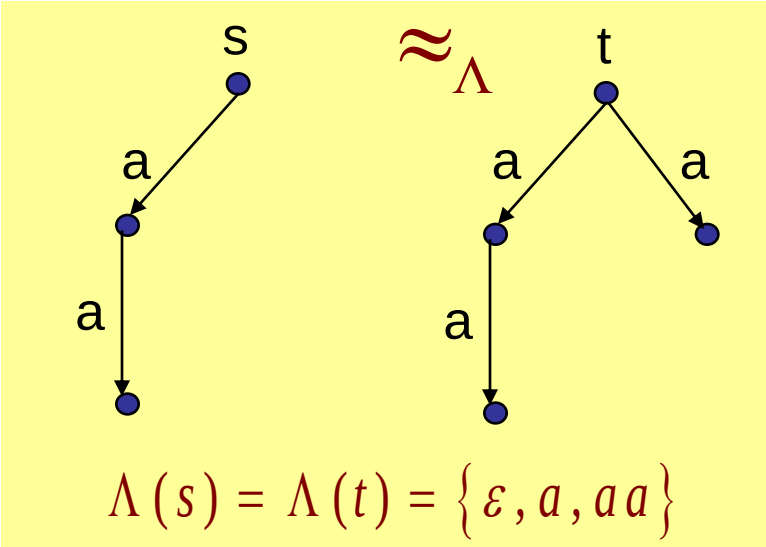
- Legyen T_1 és T_2 két LTS, s_1 és s_2 kezdőállapottal
- Definíció:

$$T_1 \approx_\Lambda T_2 \quad \text{a.cs.a.} \quad \Lambda(s_1) = \Lambda(s_2)$$

- Példák:



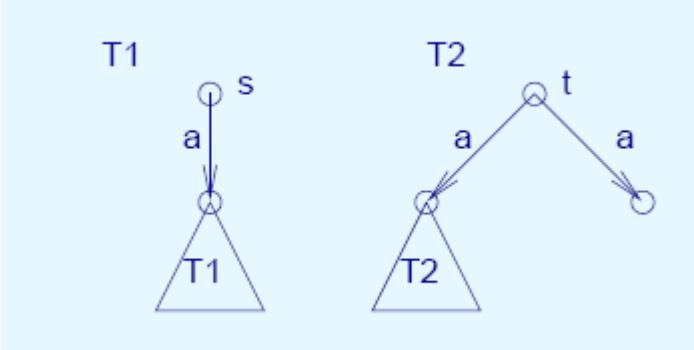
$$\Lambda(s) = \Lambda(t) = \{\varepsilon, a, ab, ac\}$$



$$\Lambda(s) = \Lambda(t) = \{\varepsilon, a, aa\}$$

I. Trace ekvivalencia: Problémák

- Érzékenység a deadlock-ra
  - Ekvivalens LTS-ekre más-más deadlock viselkedés
  - Oka pl. a nemdeterminizmus
  - Azonos trace-ek, de különböző állapotokon keresztül



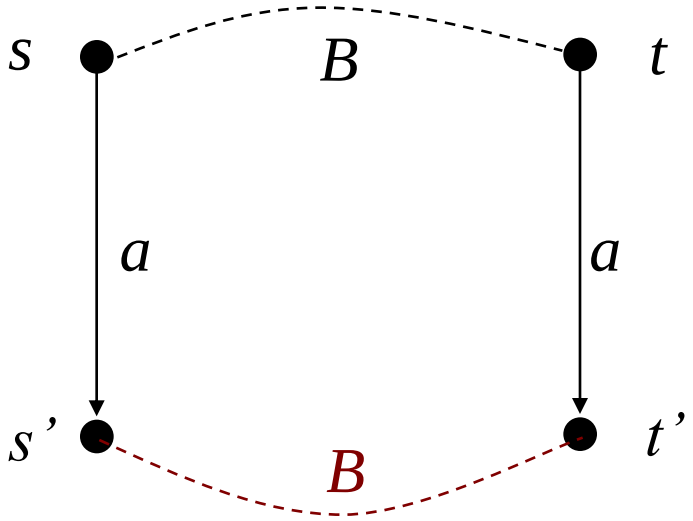
- Megoldás:
  - Ekvivalencia relációk, amelyek előírják ekvivalens állapotok bejárását

II. Erős biszimuláció ekvivalencia: Definíció

- Definíció:

  $B \subseteq S \times S$ biszimuláció, ha minden $(s,t) \in B$ és bármely $a \in Act,\ s' \in S$ esetén fennáll:

  - ha $s \xrightarrow{a} s'$ akkor $\exists t' : t \xrightarrow{a} t'$ és $(s',t') \in B$
  - ha $t \xrightarrow{a} t'$ akkor $\exists s' : s \xrightarrow{a} s'$ és $(s',t') \in B$



II. Erős biszimuláció ekvivalencia: Tulajdonságok

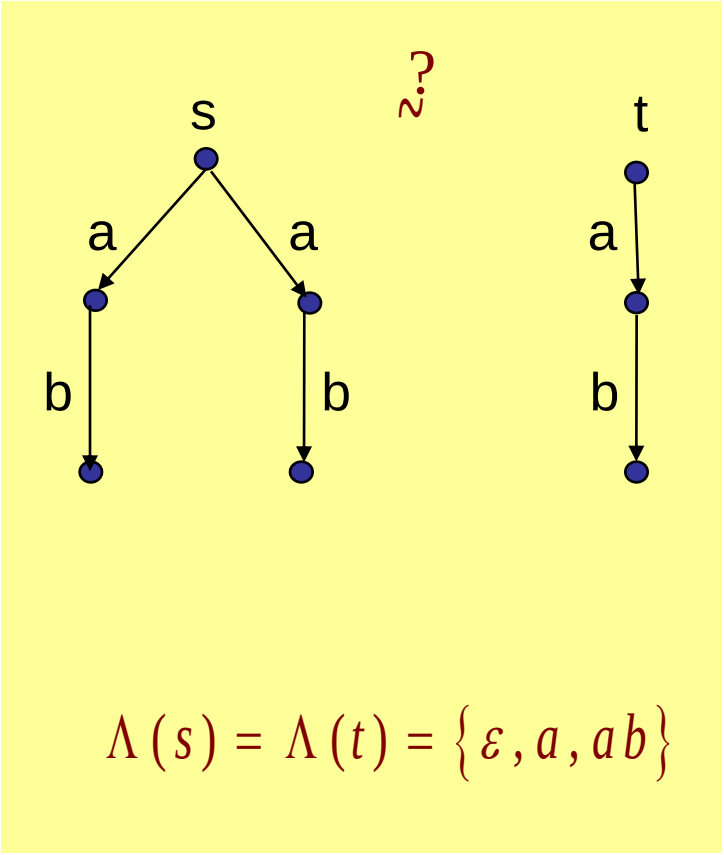
- Erős biszimuláció ekvivalencia:

$$T_1 \sim T_2 \quad \text{a.cs.a.} \quad s_1 \sim s_2 \quad \text{azaz} \quad \exists B : (s_1, s_2) \in B$$

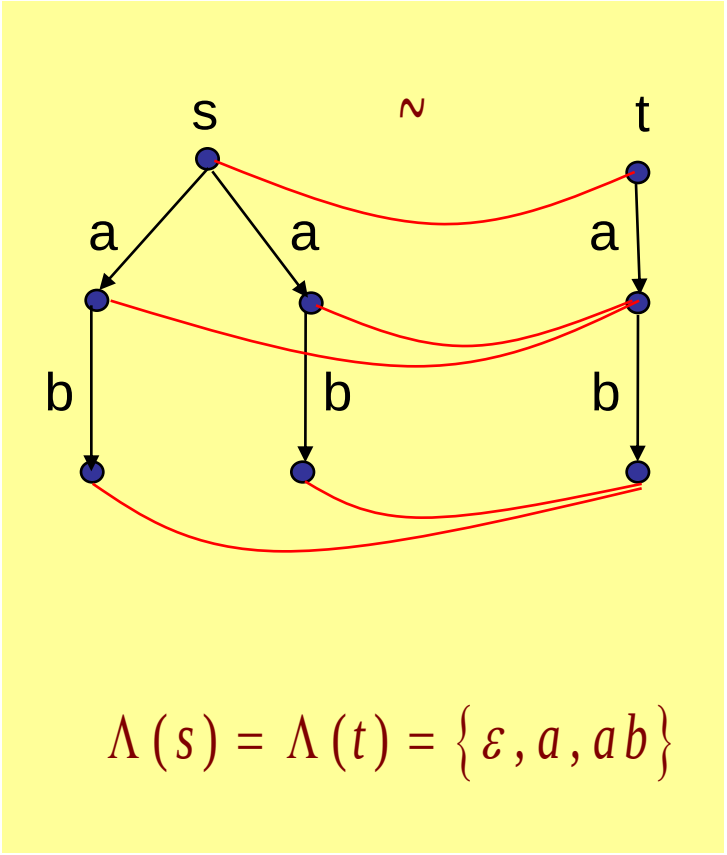
- Intuitív: Egymás viselkedését „szimulálják”
  - Ekvivalens állapotokban illeszkedő átmenetek
  - Azonos akciószekvenciák ekvivalens állapotokon át
- Kedvező tulajdonságok:
  - Erős biszimuláció következménye a trace ekvivalencia (determinisztikus LTS-re egybeesnek)
  - Kongruencia CCS LTS-ekre (fa, csúcsokhoz csatlakozás)
  - Erős biszimuláció ekvivalens rendszerek deadlock szempontjából azonosak (ha ez egyikben deadlock lehet, akkor a másikban is)

II. Erős biszimuláció ekvivalencia: Példák

- Példa:



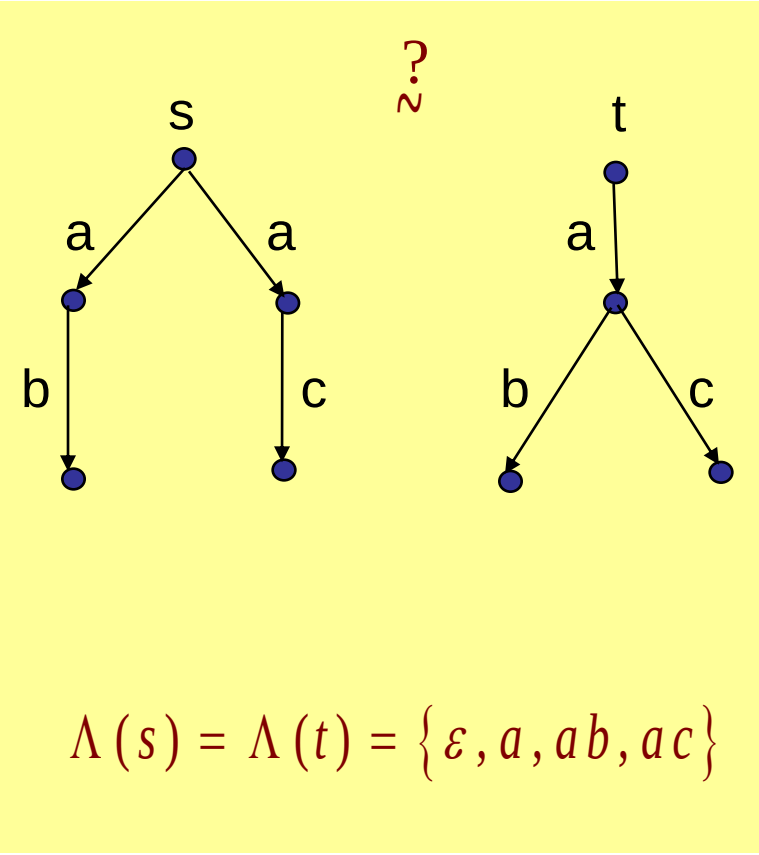
$$\Lambda(s) = \Lambda(t) = \{\varepsilon, a, ab\}$$



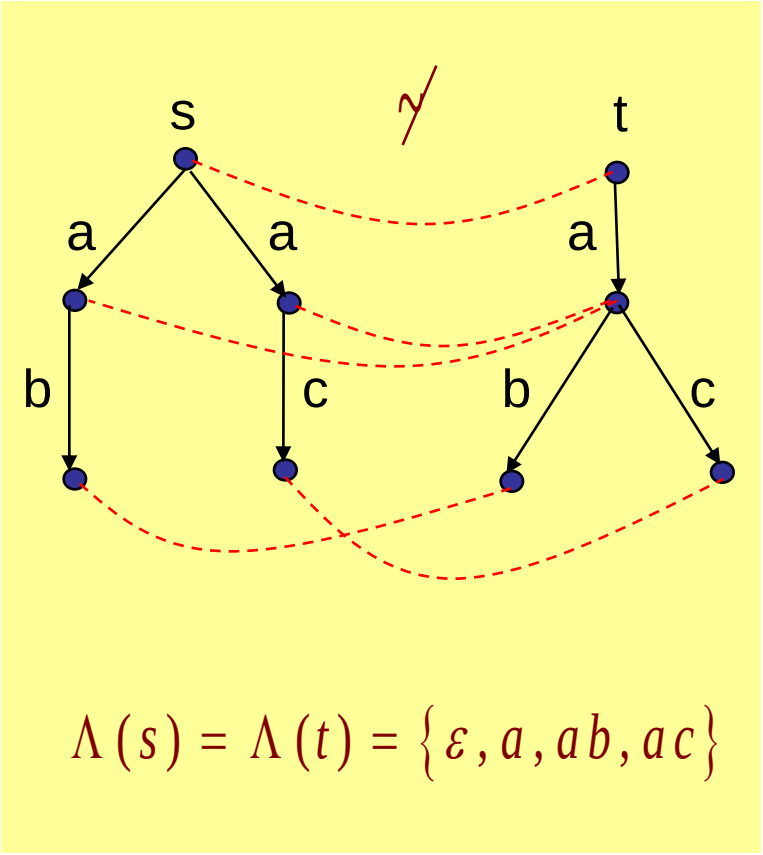
$$\Lambda(s) = \Lambda(t) = \{\varepsilon, a, ab\}$$

II. Erős biszimuláció ekvivalencia: Példák

- Példa:



$$\Lambda(s) = \Lambda(t) = \{\varepsilon, a, ab, ac\}$$



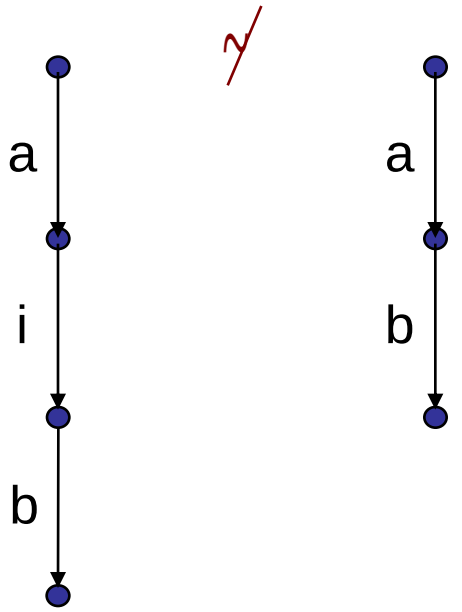
$$\Lambda(s) = \Lambda(t) = \{\varepsilon, a, ab, ac\}$$

II. Erős biszimuláció: Deadlock formalizálása

- Deadlock lehetőség kifejezése a Hennessy-Milner logika segítségével:
  - Az a akcióra: [a]false
    - Ez csak akkor lehet igaz, ha nincs a-val címkézett átmenet, azaz a-ra deadlock van!
  - Egy akcióhalmazra: $\{[a_1]\text{false} \wedge [a_2]\text{false} \wedge \ldots \wedge [a_n]\text{false}\}$
  - Egy elért állapotban: $\langle b_1\rangle\ldots\langle b_n\rangle \{[a_1]\text{false} \wedge \ldots \wedge [a_2]\text{false}\}$
- Tétel: LTS-ekben $T_1 \sim T_2$ a.cs.a., ha minden p HML kifejezésre
  - vagy $T_1,s_1 \models p$ és $T_2,s_2 \models p$,
  - vagy $T_1,s_1 \not\models p$ és $T_2,s_2 \not\models p$

II. Erős biszimuláció ekvivalencia: Problémák

- Érzékenység a megfigyelhető hatás nélküli belső átmenetekre:
  - Nincs megfigyelhető hatás, ha a végrehajtás nem befolyásolja a további viselkedést (deadlock-ot)
  - Egyszerű példa:



III. Gyenge biszimuláció ekvivalencia: Jelölések

- Az erős biszimuláció „gyenge” változata
  - Nem érzékeny a megfigyelhető hatás nélküli belső átmenetekre
  - Lényege: Azonos megfigyelhető akciószekvenciák ekvivalens állapotokon keresztül
- Jelölések:

$\alpha \in Act^*$ véges akciószekvencia (ε az üres)

$\hat{\alpha} \in (Act - \tau)^*$ megfigyelhető akciószekvencia (τ törlése)

itt $\hat{\alpha} = \varepsilon$ ha $\alpha = \tau$

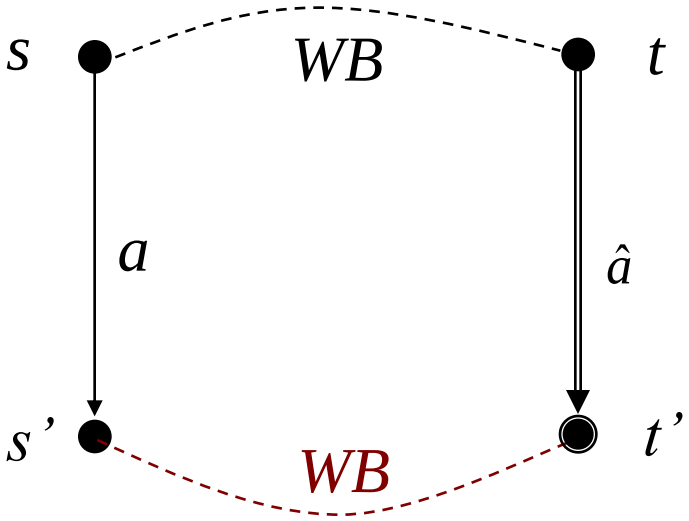
$s \overset{\beta}{\Rightarrow} s'$ ha $\exists \alpha : s \overset{\alpha}{\rightarrow} s'$ és $\beta = \hat{\alpha}$

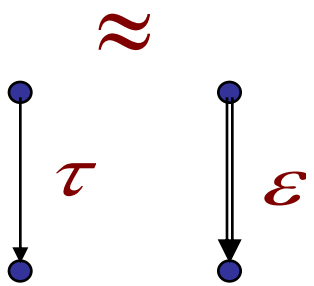
III. Gyenge biszimuláció ekvivalencia: Definíció

- **Definíció:**

  $WB \subseteq S \times S$ gyenge biszimuláció, ha minden $(s,t) \in WB$ és bármely $a \in Act,\ s',t' \in S$ esetén fennáll:

  - ha $s \xrightarrow{a} s'$ akkor $\exists t' : t \overset{\hat{a}}{\Rightarrow} t'$ és $(s',t') \in WB$
  - ha $t \xrightarrow{a} t'$ akkor $\exists s' : s \overset{\hat{a}}{\Rightarrow} s'$ és $(s',t') \in WB$





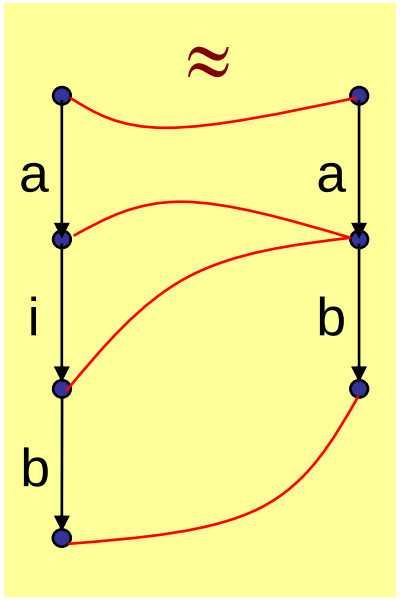
III. Gyenge biszimuláció ekvivalencia: Példák

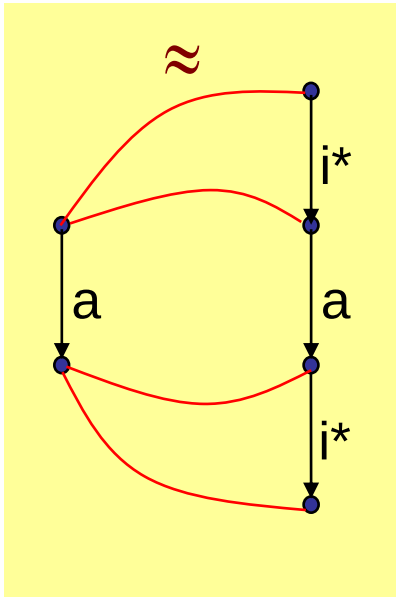
- Gyenge biszimuláció ekvivalencia
  = Megfigyelési ekvivalencia (observation equiv.)

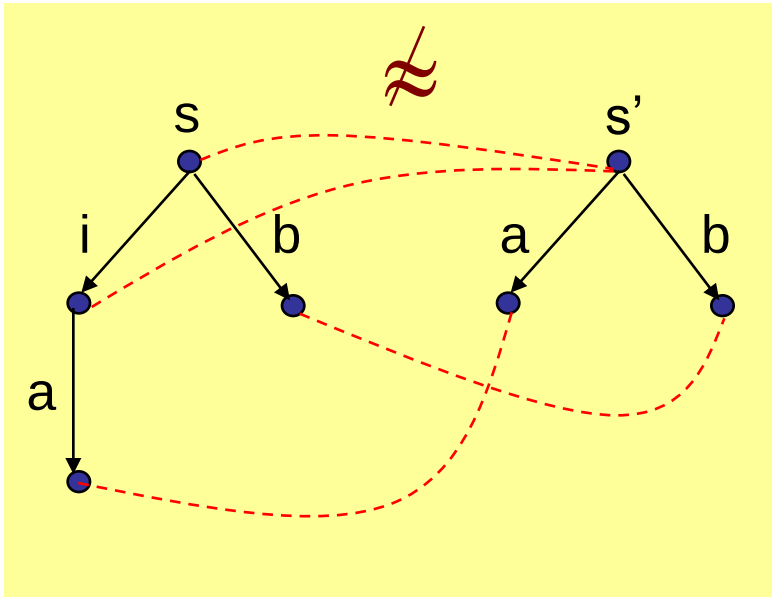
$$T_1 \approx T_2 \quad \text{a.cs.a.} \quad s_1 \approx s_2 \quad \text{azaz} \quad \exists\, WB : (s_1, s_2) \in WB$$

- Példák:

Hatással járó belső tranzíció:





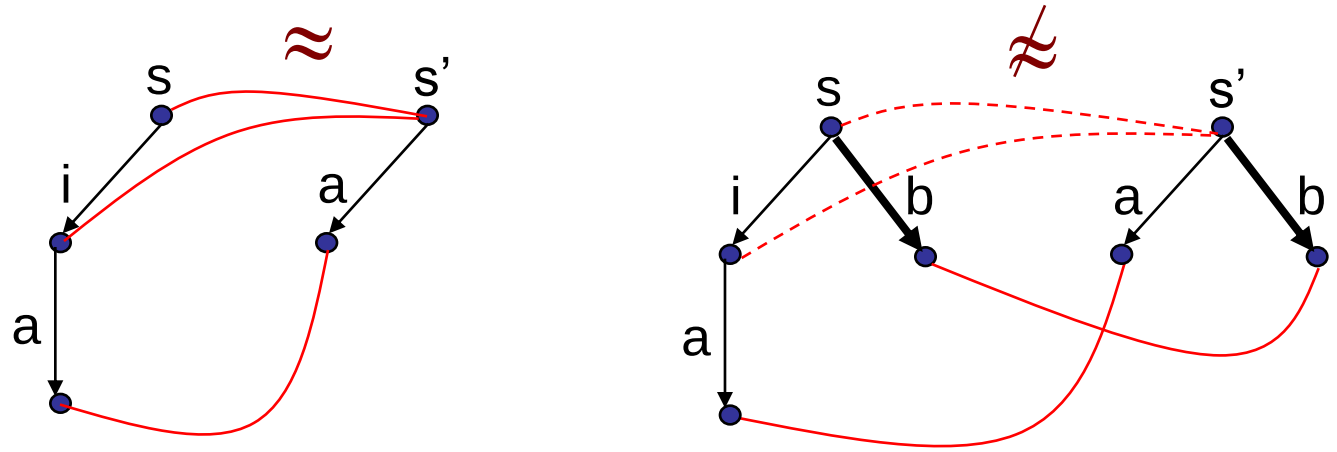


III. Gyenge biszimuláció: Deadlock formalizálás

- HML variáns megfigyelhető akciókra:
  HML* ::= true | false | $p \wedge q$ | $p \vee q$ | [[a]]p | <<a>>p
- Szemantika:
  - **H3***: T,s |= [[a]]p a.cs.a. $\forall$s' ahol s $\Rightarrow^a$ s': s' |= p
  - **H4***: T,s |= <<a>>p a.cs.a. $\exists$s': s $\Rightarrow^a$ s' és s' |= p
- Tétel: LTS-ekben $T_1 \approx T_2$ a.cs.a.
  ha minden p HML* kifejezésre
  - vagy T_1,s_1 |= p és T_2,s_2 |= p
  - vagy T_1,s_1 $\not|=$ p és T_2,s_2 $\not|=$ p

III. Gyenge biszimuláció ekvivalencia: Tulajdonságok

- Nem kongruencia CCS LTS-re (ellenpélda van)



- Érdekesség: Legmegengedőbb kongruencia reláció, amiből következik a gyenge biszimuláció ekvivalencia:

$s \approx^c t$, ha bármely $a \in Act,\ s', t' \in S$ esetén fennáll:

- ha $s \xrightarrow{a} s'$ akkor $\exists t' : t \overset{a}{\Rightarrow} t'$ és $s' \approx t'$
- ha $t \xrightarrow{a} t'$ akkor $\exists s' : s \overset{a}{\Rightarrow} s'$ és $s' \approx t'$

Ekvivalencia relációk számítási módszere

Partíció finomítás

1. Kezdetben minden állapotpár eleme a relációnak

   Egy partíciót (ekvivalencia osztályt) képeznek

2. Minden állapotpárra:

   Ha az egyikből indulva van olyan átmenet,

   ami a másikból indulva a definíció szerint nem szimulálható, akkor

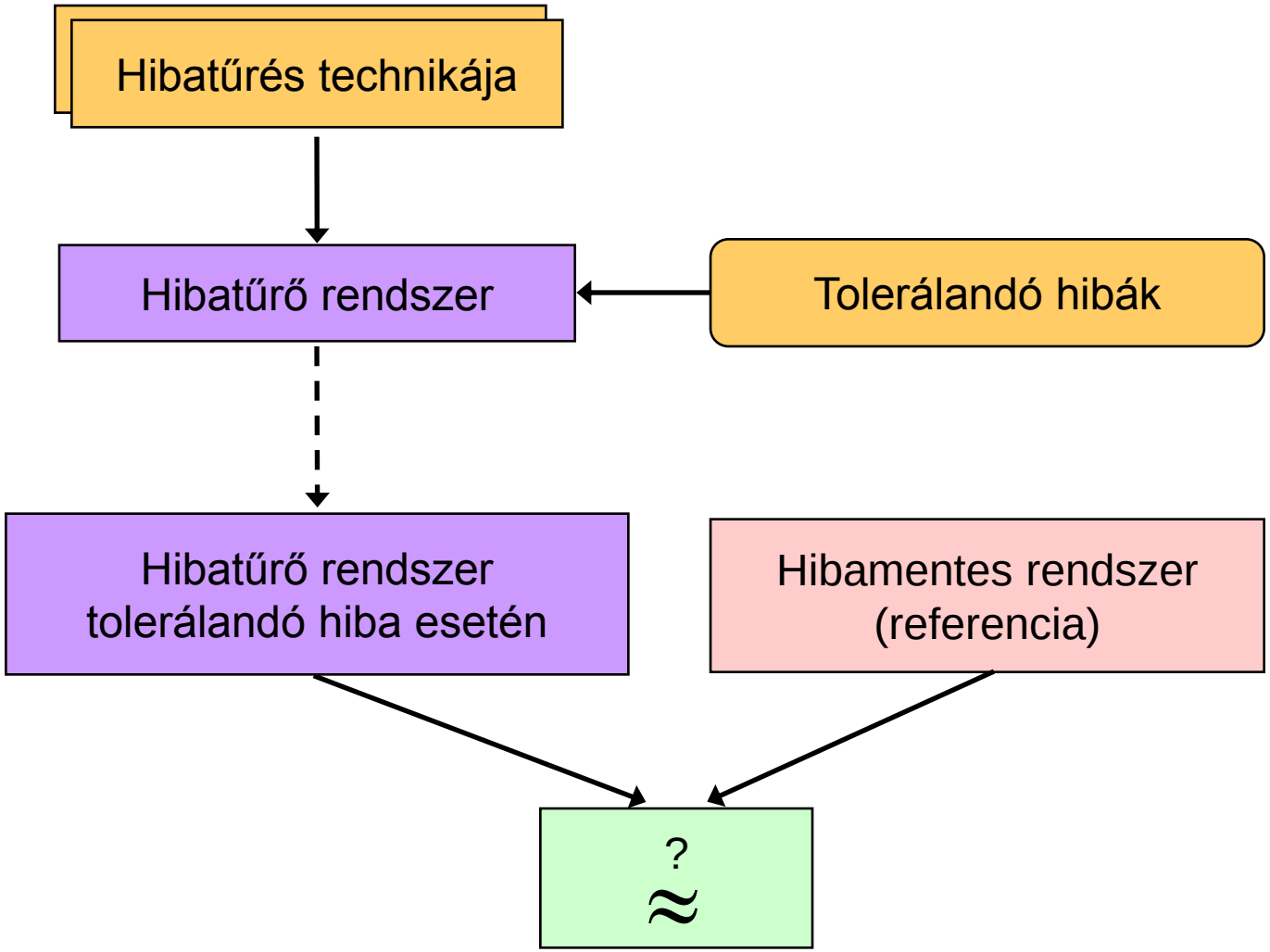
   – Az adott állapotpár kizárása (nem ekvivalensek);
   – A következmények végigvezetése a bejövő átmenetek végein lévő állapotokra
     - Nem ekvivalensek, ha nem ekvivalens állapotokba kerülnek

3. Ha már nincs változás (fixpont):
   Végleges ekvivalencia osztályok adódtak

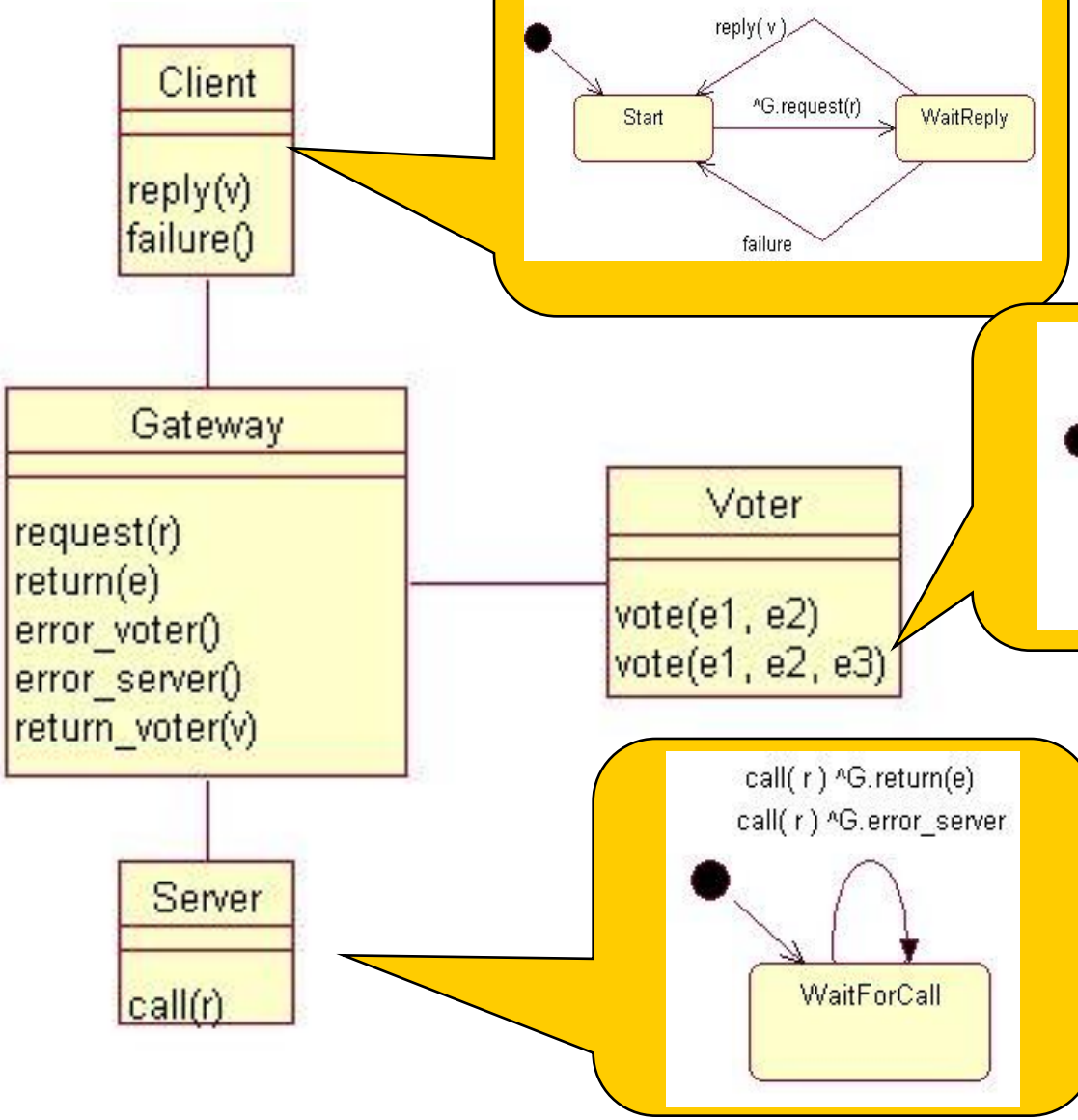
   Ha a kezdőállapotok azonos ekvivalencia osztályban vannak, akkor az LTS-ek ekvivalensek

Esettanulmány:
Hibatűrés ellenőrzése megfigyelési ekvivalencia reláció használatával

Mintapélda: Hibatűrés verifikációja



Rendszerarchitektúra



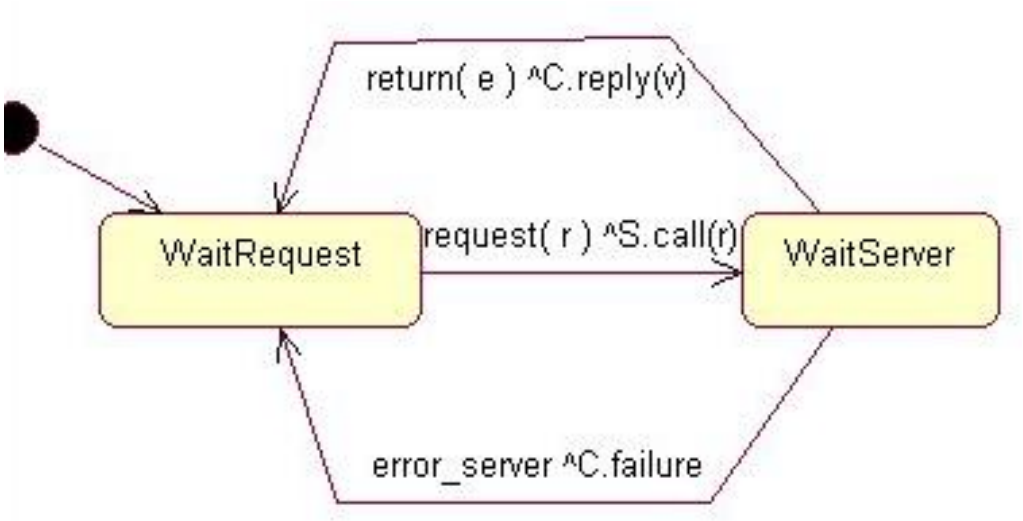
Hibamodell: Szerver által adott válasz adathibája

Hibatűrés: Szavazás és alternatív szerver

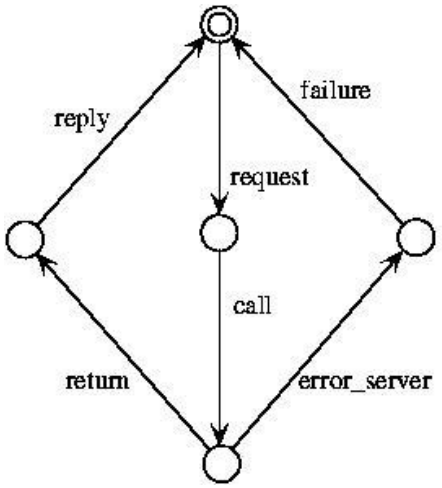
Ellenőrzés a kliens szempontjából: Gateway viselkedése megfigyelhető

A Gateway komponens hibatűrés nélküli viselkedése

- Állapotdiagram:

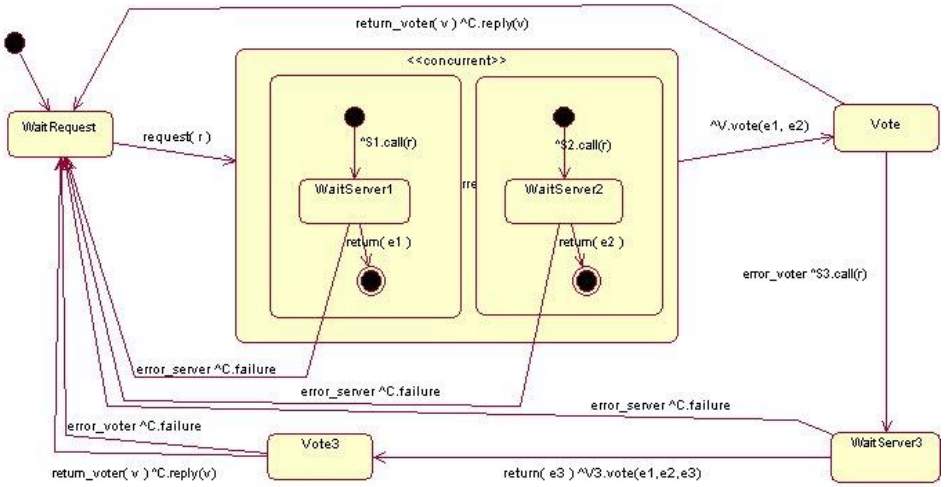


- LTS megfelelője:

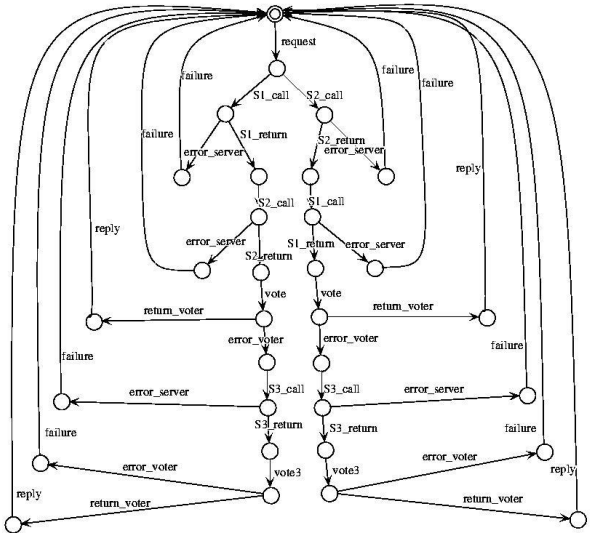


A Gateway komponens hibatűrés esetén

- Állapotdiagram:

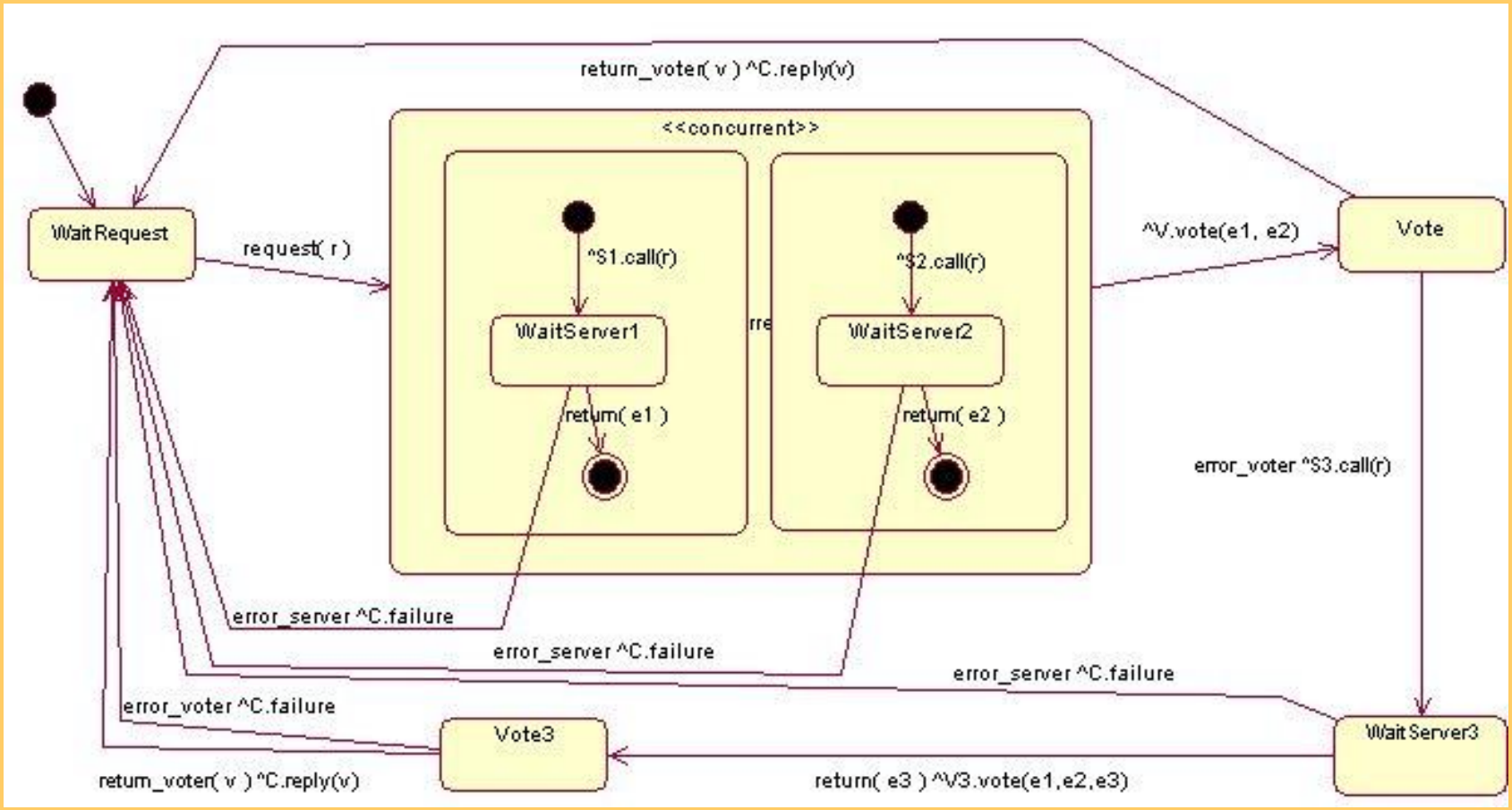


- LTS megfelelője:



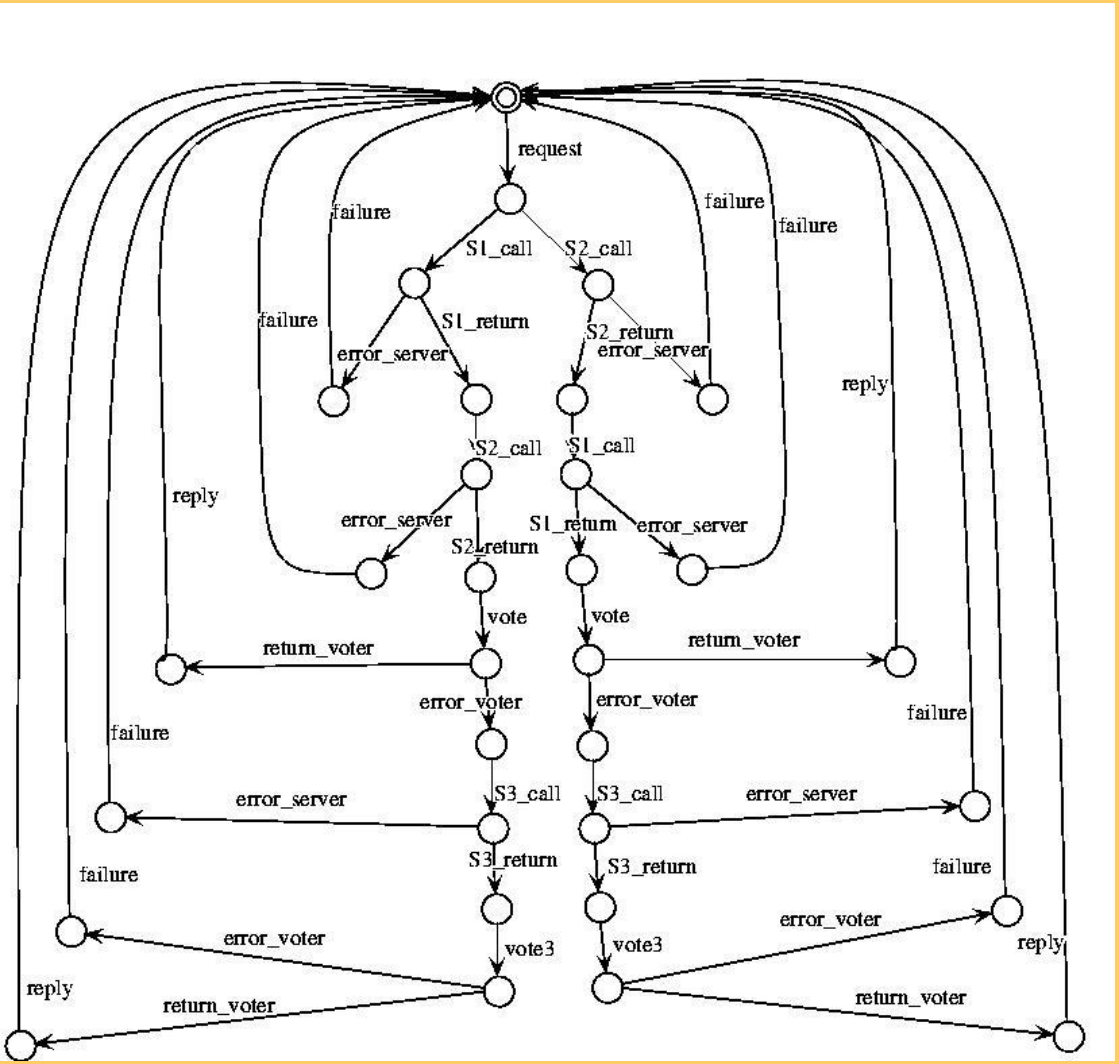
A Gateway komponens hibatűrés esetén

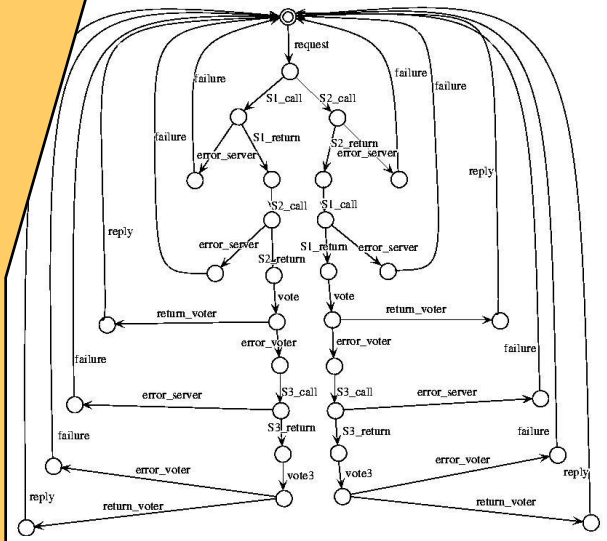
- Állapotdiagram:
- LTS megfelelője:



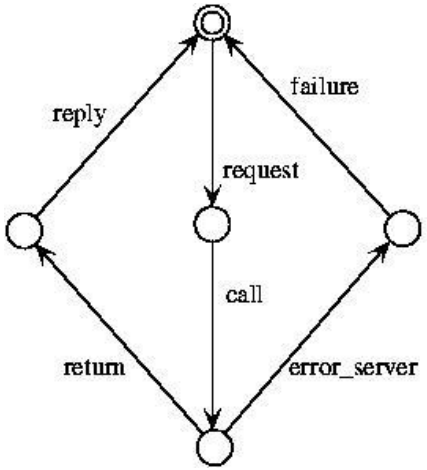
A Gateway komponens hibatűrés esetén

LTS megfelelője:

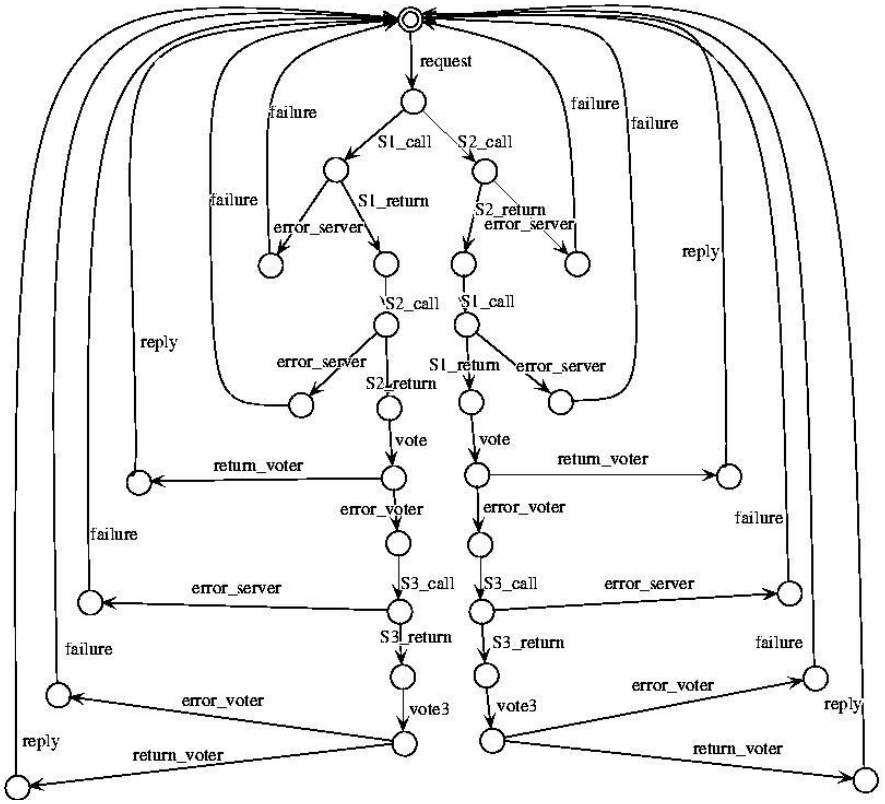




Viselkedési ekvivalencia igazolása



≈



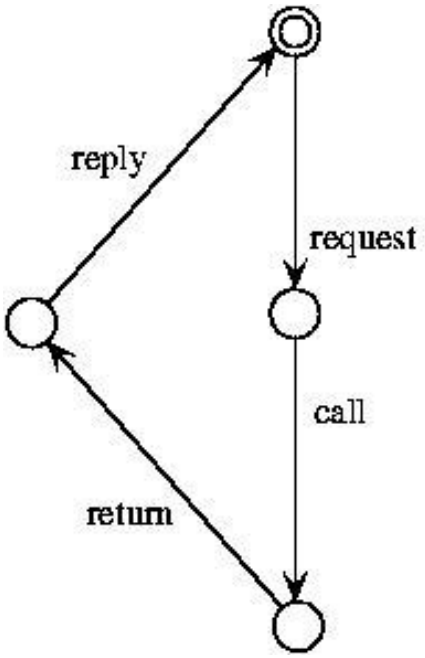
Gateway referencia viselkedés

Így igazolható, hogy a kliens számára transzparens a hibatűrő mechanizmus működése.

Hibatűrő Gateway teljes viselkedése;

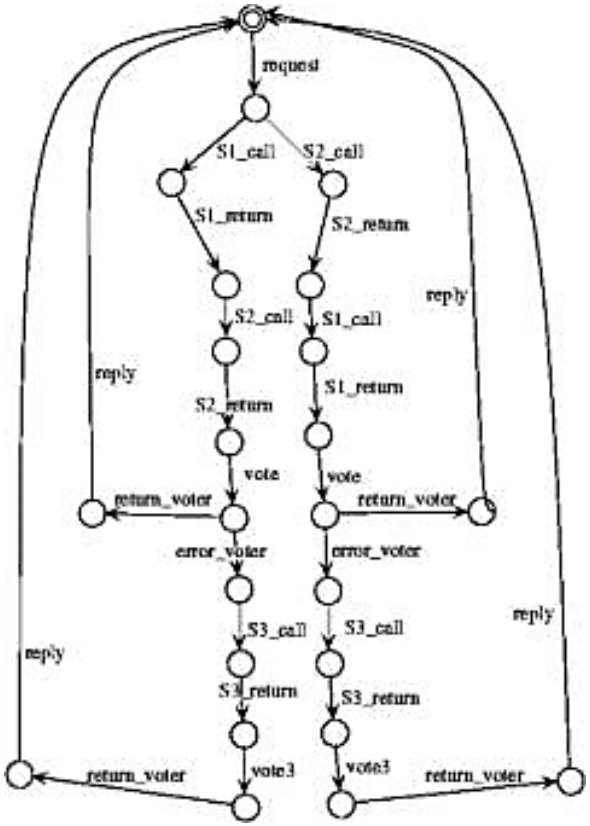
Itt minden olyan akció τ lesz, ami nincs a referencia viselkedésben!

Hibatűrés igazolása az első szerver hibája esetén



Hibamentes
Gateway

≈



Az adott hiba esetén a kliens szempontjából megvalósul a hibatűrés.

Hibatűrő Gateway a hiba esetén;
Itt minden olyan akció τ lesz,
ami nincs a referencia viselkedésben