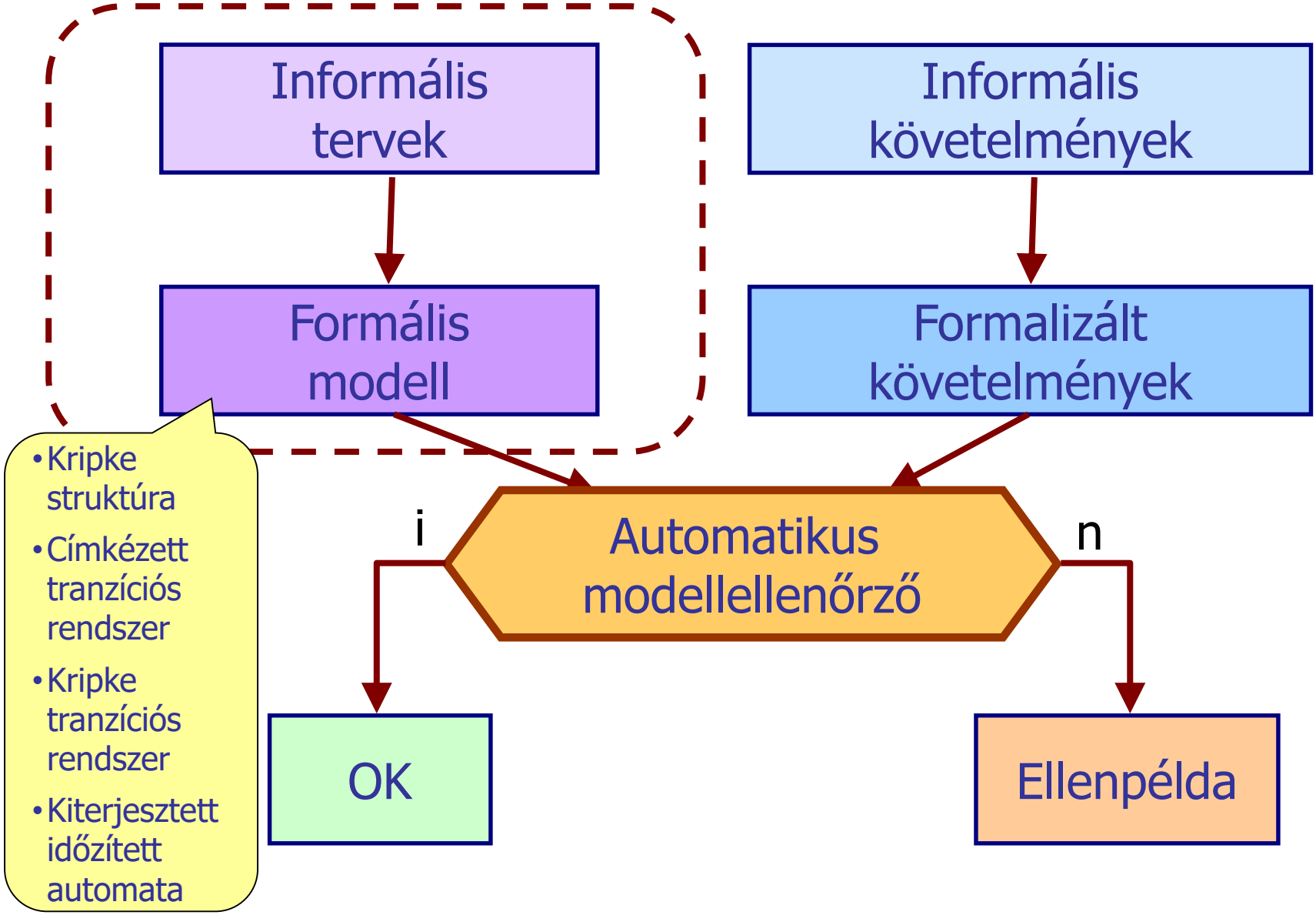
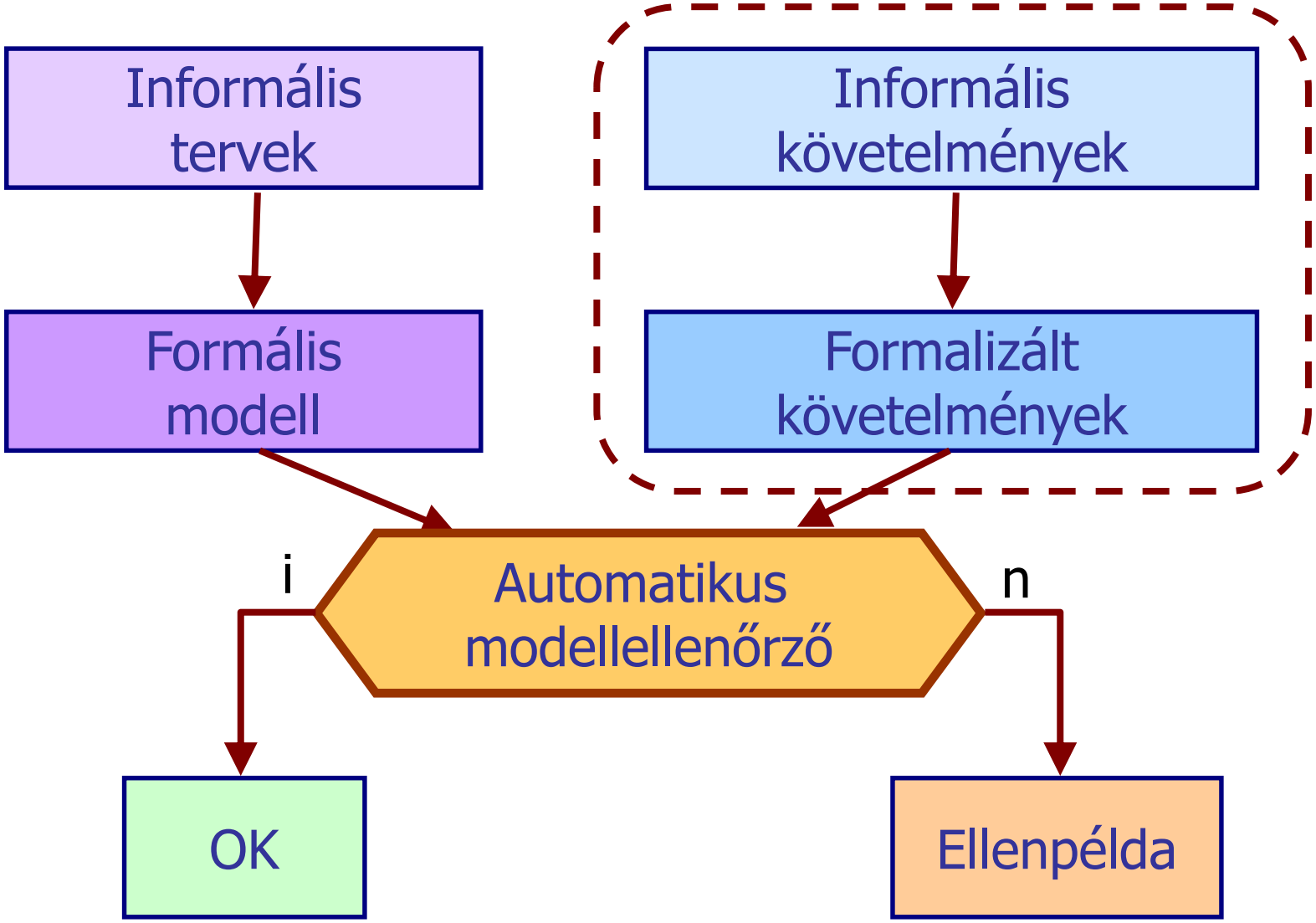
Követelmények formalizálása: Temporális logikák

dr. Majzik István
BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Formális verifikáció



Mi a következő lépés?



Informális, szöveges követelmények

- Tipikus követelmény megadás: Szöveges forma

> If the `switch` is turned to `AUTO`, and the `light intensity` is `LOW` then the `headlights` should stay or turn immediately `ON`, afterwards the `headlights` should continue to stay `ON` in `AUTO` as long as the `light intensity` is not `HIGH`.

  - Egyértelmű-e a szöveges leírás?
  - Nehezen áttekinthető a struktúra (feltétel, következmény, időzítési viszonyok, …)
  - Nehezen feldolgozható (ellenőrzéshez, implementációhoz, teszteléshez, …)
- Hogyan formalizálhatók a követelmények?

Követelmények rögzítése és formalizálása

Mit tudunk a jellegzetes követelményekről (kritikus rendszerekben)?

Mit érdemes formalizálni?

Mintapélda: Kölcsönös kizárás

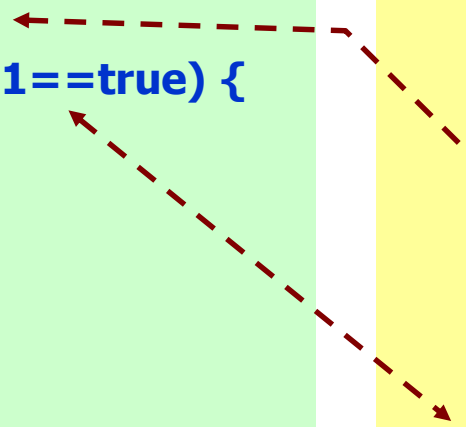
- 2 résztvevőre, 3 megosztott változóval (H. Hyman, 1966)
  - **blocked0**: Első résztvevő (P0) be akar lépni
  - **blocked1**: Második résztvevő (P1) be akar lépni
  - **turn**: Ki következik belépni (0 esetén P0, 1 esetén P1)

P0

```
while (true) {
    blocked0 = true;
    while (turn!=0) {
        while (blocked1==true) {
            skip;
        }
        turn=0;
    }
    // Critical section
    blocked0 = false;
    // Do other things
}
```

P1

```
while (true) {
    blocked1 = true;
    while (turn!=1) {
        while (blocked0==true) {
            skip;
        }
        turn=1;
    }
    // Critical section
    blocked1 = false;
    // Do other things
}
```



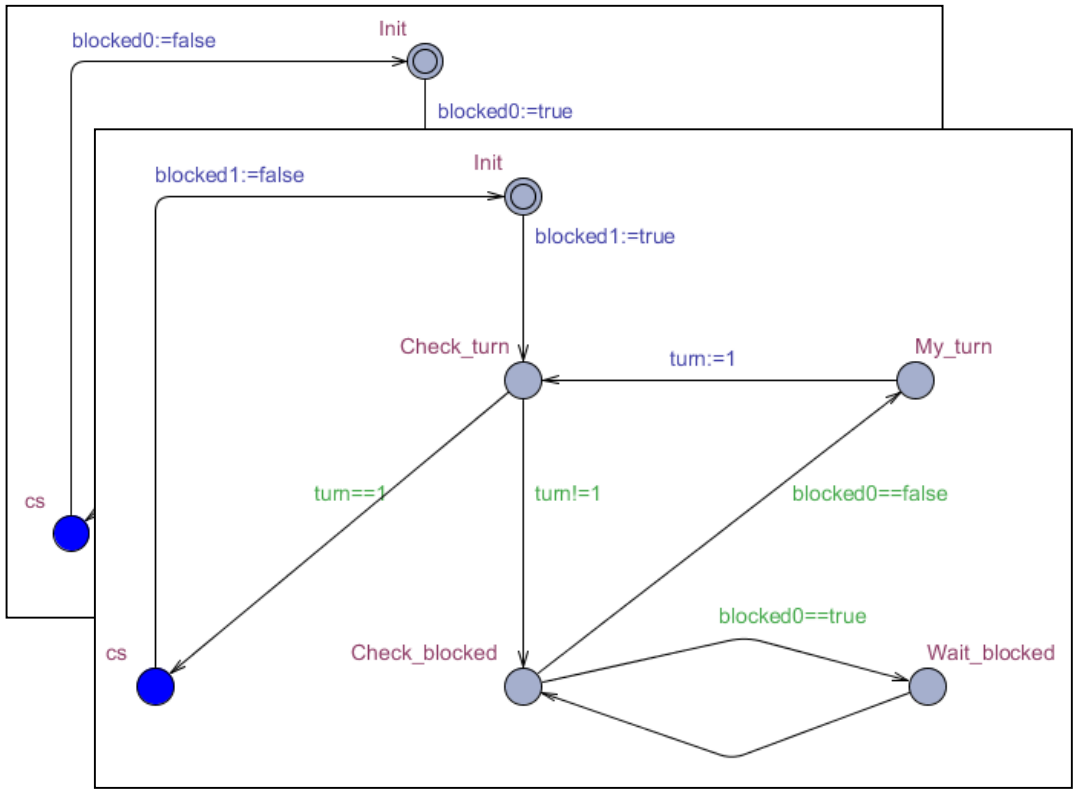
Helyes-e ez az algoritmus?

A modell UPPAAL-ban

Deklarációk:

```
bool blocked0=false;
bool blocked1=false;
int[0,1] turn=0;
system P0, P1;
```

A P0 és P1 automata:



P0

```
while (true) {
   blocked0 := true;
   while (turn!=0) {
        while (blocked1==true) {
   }
   //
   bl
   //
}
```

P1

```
while (true) {
   blocked1 := true;
   while (turn!=1) {
        while (blocked0==true) {
              skip;
        }
        turn := 1;
   }
   // Critical section (cs)
   blocked1 := false;
   // Do other things
}
```

Ellenőrizendő követelmények

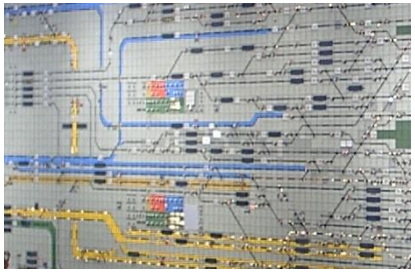
- Kölcsönös kizárás:
  - Soha nem lehet egyszerre P0 és P1 a kritikus szakaszban
- Lehetséges az elvárt viselkedés:
  - P0 valamikor be fog lépni a kritikus szakaszba
  - P1 valamikor be fog lépni a kritikus szakaszba
- Nincs kiéheztetés:
  - P0 mindenképpen be fog lépni a kritikus szakaszba
  - P1 mindenképpen be fog lépni a kritikus szakaszba
- Holtpontmentesség:
  - Soha nem alakul ki kölcsönös várakozás (leállás)

Hogyan formalizálhatjuk ezeket?

Milyen jellegű követelményeket formalizálunk?

- Verifikáció: Modell ↔ Sokféle követelmény
  - Funkcionális: Logikailag helyes a működés ← Most ez a célunk
  - Extra-funkcionális: Teljesítmény, megbízhatóság, … ← Később
- Célkitűzés: Állapotok elérhetőségének ellenőrzése
  - Rendszer(modell): Állapotok lokális tulajdonságait ismerjük
    - Állapot neve, címkéje, állapotváltozók értéke, …
  - Követelmények: Állapotok bekövetkezési lehetőségeit vizsgáljuk
    - Elkerüljük-e a kedvezőtlen állapotokat? (Ld. „Soha nem lehet …”)
    - Eljuthatunk-e kedvező állapotba? (Ld. „Valamikor be fog lépni …”)

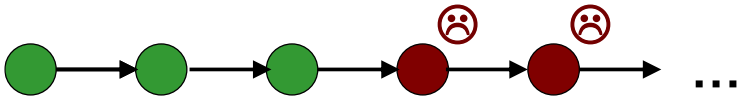
    Ezek az állapottér teljes felderítésével ellenőrizhetők
- Fontos állapot alapú, eseményvezérelt rendszerekben



Jellegzetes követelmény kategóriák

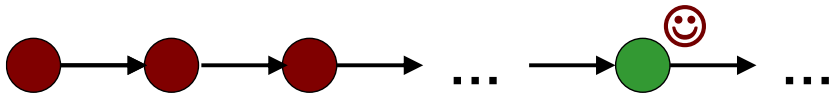
Biztonsági követelmények

- Veszélyes helyzetek elkerülését írják elő:
  - „Minden állapotban kisebb a nyomás a kritikusnál.”
  - „Nincs több processz a kritikus szakaszban.”
- Univerzális tulajdonság az elérhető állapotokon:
  - „Minden elérhető állapotban igaz, hogy …”
  - Invariáns tulajdonság
  - Ha egy állapotsorozat nem teljesíti: Nem is egészíthető ki úgy, hogy teljesítse

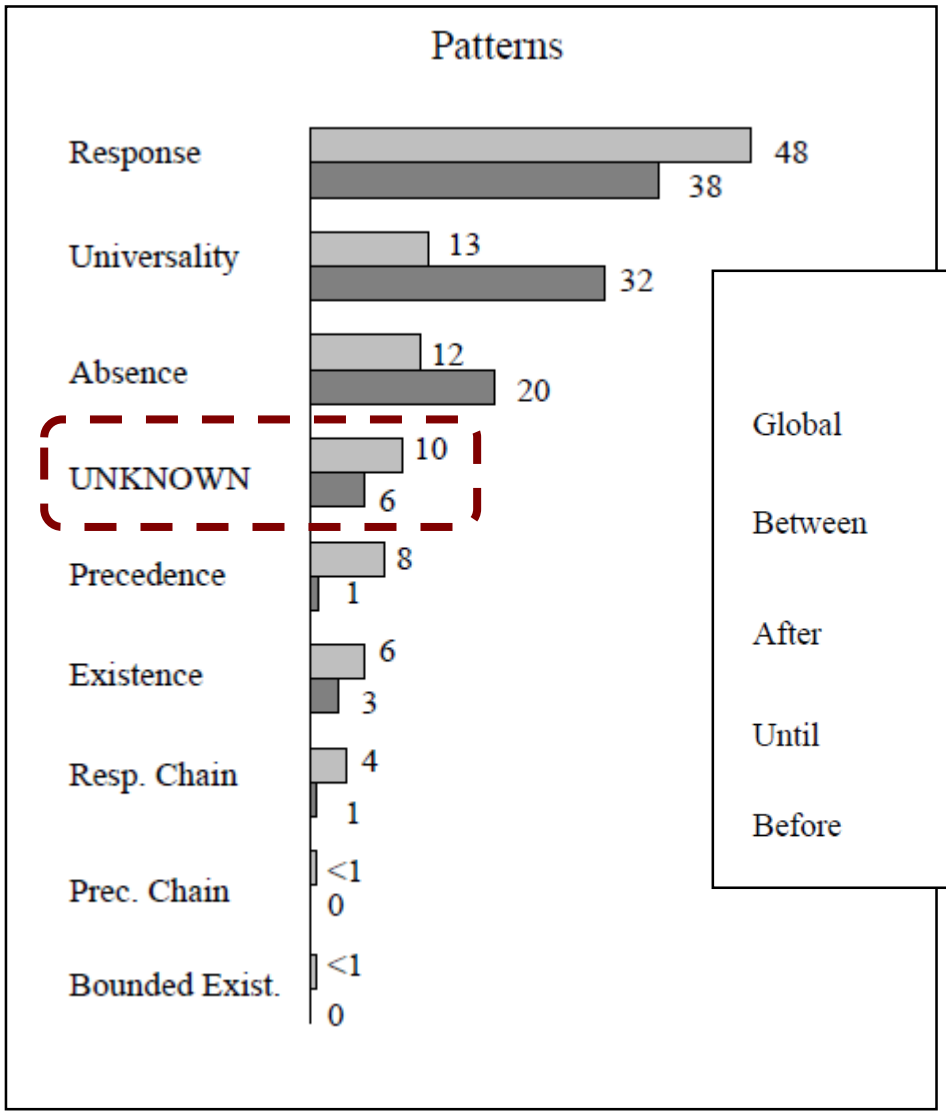


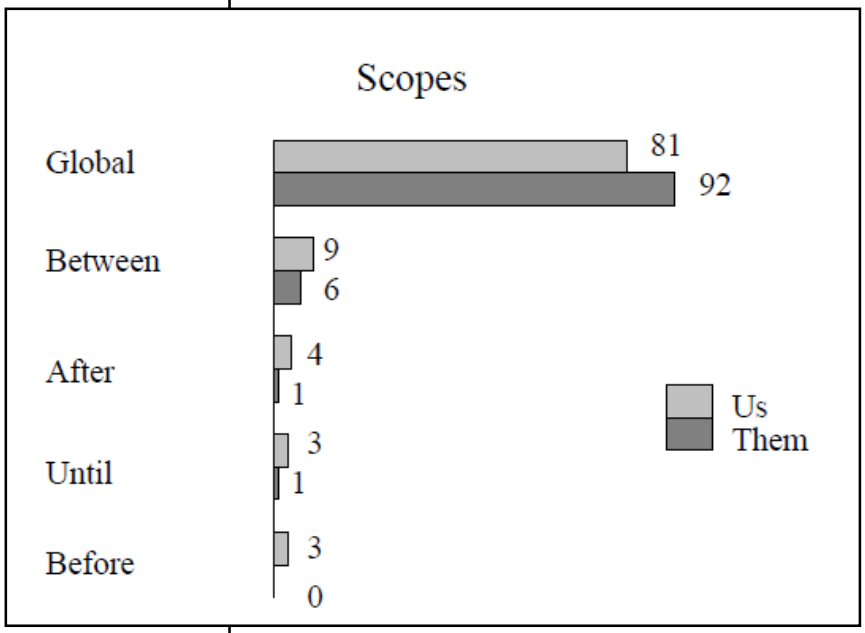
Élő jellegű követelmények

- Kívánatos helyzetek elérését írják elő
  - „Az indítás után a présgép kiadja a kész terméket.”
  - „A kérés kiszolgálása előbb-utóbb megtörténik.”
- Egzisztenciális tulajdonság az elérhető állapotokon
  - „Létezik (elérhető) olyan állapot, hogy …”
  - Bekövetkezést ír elő
  - Ha egy állapotsorozat nem teljesíti: Elvileg kiegészíthető úgy, hogy teljesítse



Egy felmérés eredménye: Követelmény minták





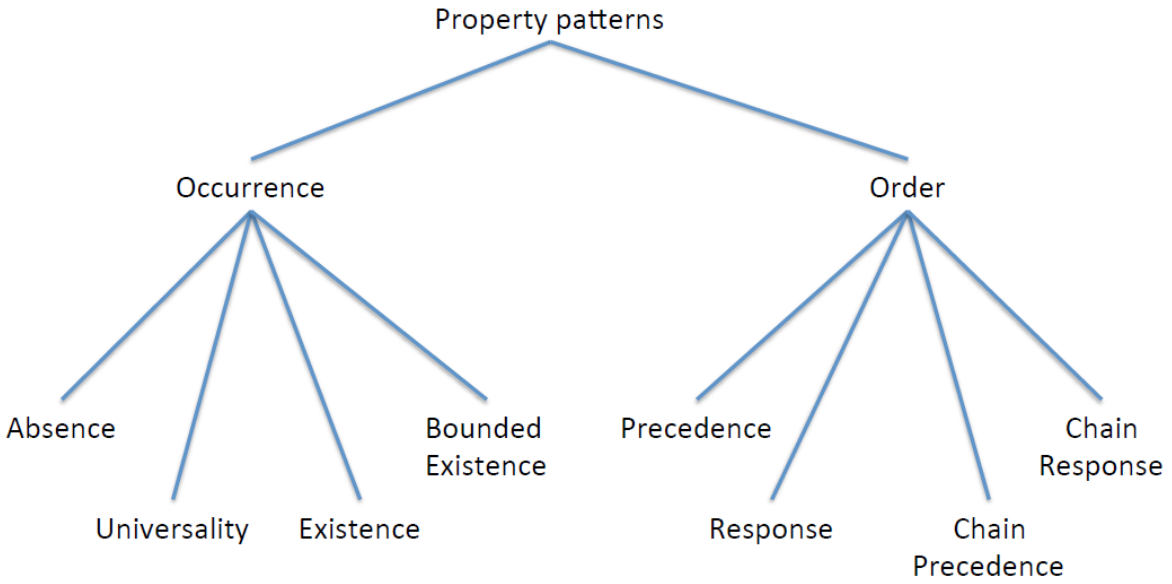
2 fejlesztői csoport által felvett szöveges követelmények vizsgálata: Követelmény minták keresése

A követelmények jelentős hányada meghatározott mintákra illeszkedik.

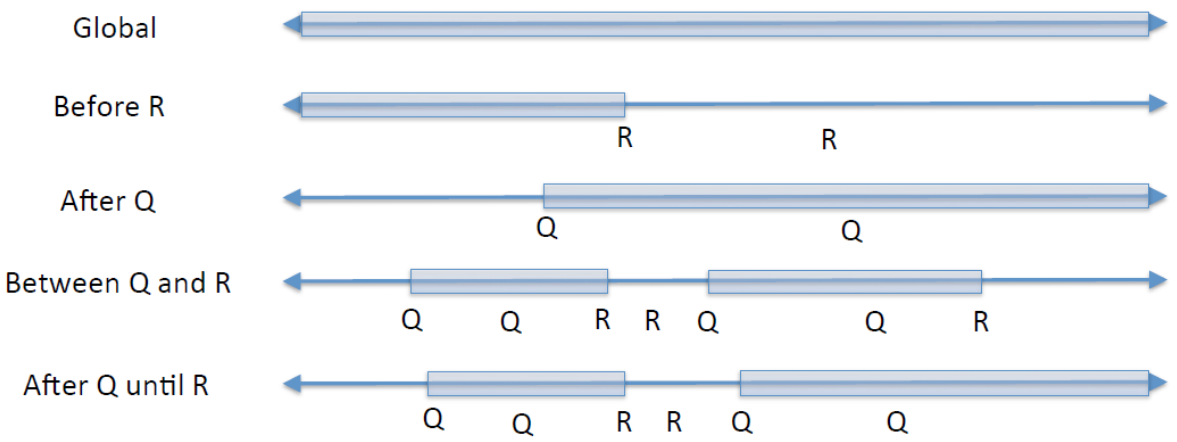
http://patterns.projects.cis.ksu.edu/documentation/patterns.shtml

Követelmény minták csoportosítása

Minták: Sorrendi előírások



Hatókörök: További eseményekhez (adott tulajdonságú állapotokhoz) képest



A minták jelentése (magyarázat)

Occurrence: Adott tulajdonságú állapotok előfordulása

- Absence: A hivatkozott állapot/esemény nem fordul elő.
- Universality: A hivatkozott állapot/esemény folyamatosan előfordul.
- Existence: A hivatkozott állapot/esemény egyszer biztosan előfordul.
- Bounded existence: A hivatkozott állapot/esemény biztosan előfordul „k” alkalommal (létezik „legalább k” és „legfeljebb k” változat is.)

Order: Adott tulajdonságú állapotok sorrendezése

- Precedence: Az egyik állapot/esemény mindenképpen meg kell, hogy előzze a másik állapotot/eseményt.
- Response: Az egyik állapotot/eseményt mindenképpen kell, hogy kövesse egy másik meghatározott állapot/esemény.
- Chain precedence: A Precedence minta általánosítása állapot / esemény sorozatokra.
- Chain response: A Response minta általánosítása állapot / esemény sorozatokra.

Példák a minták megjelenésére

- Response minta Global hatókörben:

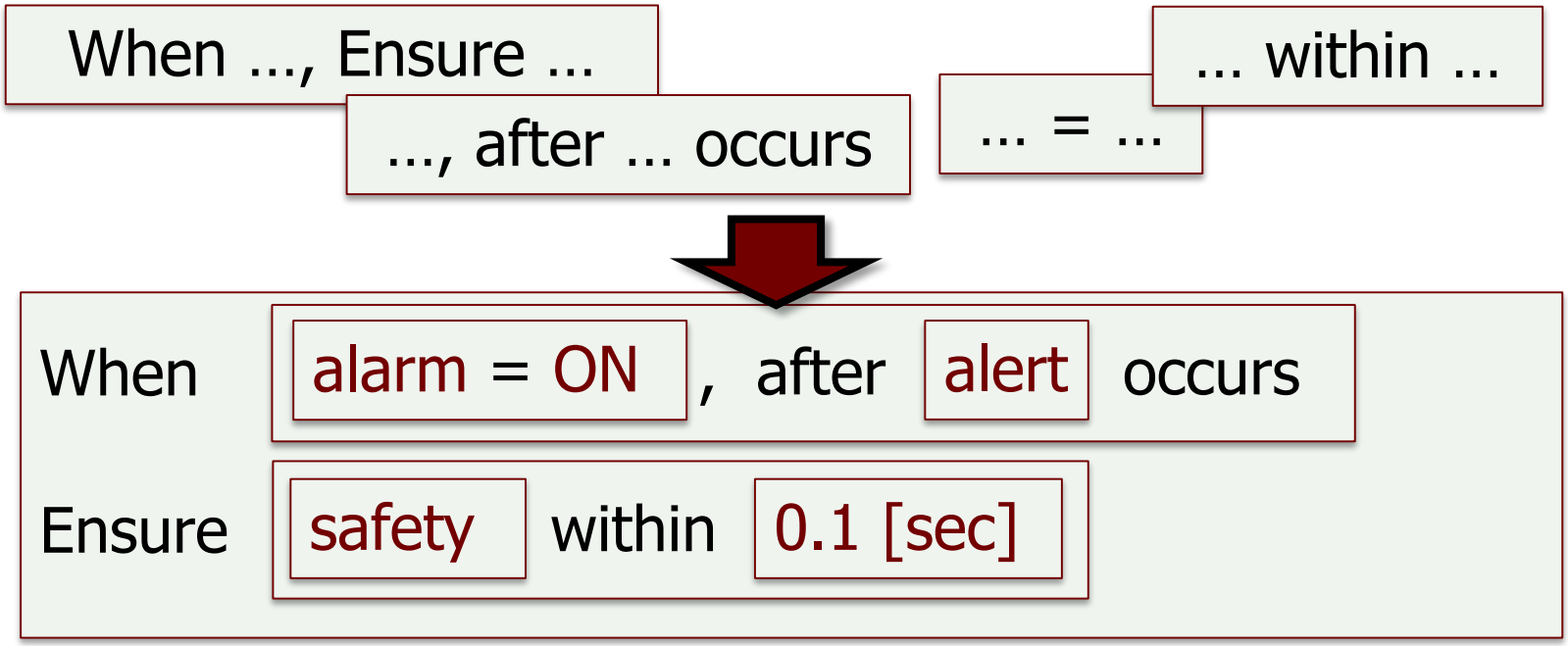
  A végrehajtás során bármikor,
  ha Request kérés következik be, akkor vagy egy Reply
  vagy egy Reject válasznak kell következnie.

- Precedence minta After hatókörben:

  A NormalMode állapot bekövetkezése után
  a ResourceGranted állapot csak akkor következhet be,
  ha ezt megelőzi ResourceRequest állapot.

Követelmény minták használata

- Egy jellegzetes megoldás*
  - Kitölthető, paraméterezhető minták
  - A minták hierarchikusan komponálhatók
  - Struktúrát áttekinthetőbbé teszi



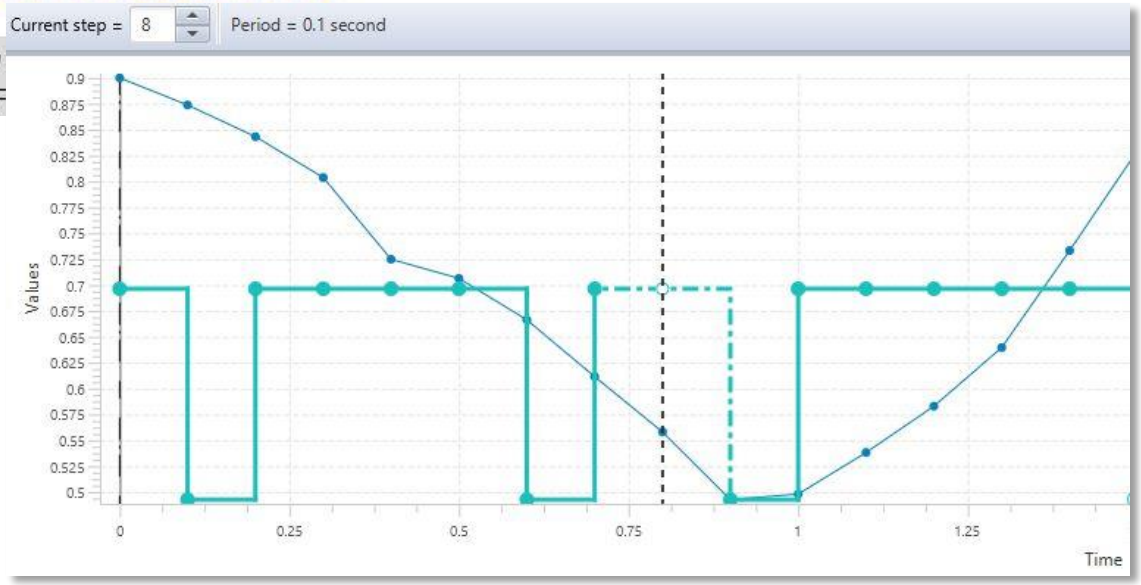
* Darvas Dániel által készített példák a STIMULUS eszköz alapján

Példa: A Stimulus eszköz

functional requirements

[LS_RQ_001] *When* LG_cmd *is* 'DOWN ,
Do
gears_extended *shall be* true *and* doors_closed *shall be* true *within* 15[second]
afterwards
gears_extended *shall be* true
doors_closed *shall be* true

REQ_003.4
Do
If initially (lightIntensity *is greater than* 70[percent]) *then*
headLight *shall be* 'OFF
afterwards
When (lightIntensity *is greater than*
When (headLight *was* 'OFF



https://www.3ds.com/products-services/catia/products/stimulus/

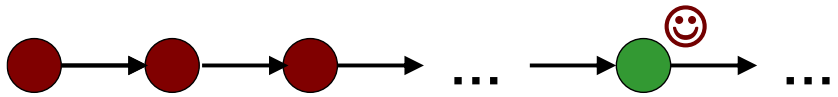
Tanulságok

- Követelmények többsége jellegzetes mintákra illeszkedik
  - Pl: Ha … akkor …, Amíg … addig …, Ha …, azután …
  - Bekövetkezés, sorrendezés eseményekre (állapotokra)
- Ha ezeket formalizálni tudjuk, akkor sok követelményt lefedhetünk
  - Az összetett követelmények sokszor egyszerűbb mintákból komponálhatók: paraméterezéssel, egymásba ágyazással
- A minták formalizálása sokat segít
  - Követelmények vizsgálata: Validáció, teljesség, konzisztencia
  - Tervek (modellek) ellenőrzése: Lefutások kimerítő vizsgálata
  - Teszt kiértékelés, futásidőbeli monitorozás komponensei generálhatók

Követelmények formalizálása temporális logikákkal

Formalizálás: Milyen leíró nyelvre van szükségünk?

- Elérhetőség: Állapotok bekövetkezését, sorrendjét írja elő
  - Bekövetkezési sorrend: Megfeleltethető a logikai időnek
    - Jelen időpillanat: Aktuális állapot
    - Következő időpillanat(ok): Rákövetkező állapot(ok) – idővonal



  - Temporális (logikai időbeli, sorrendi) operátorok használhatók a követelmények kifejezésére
- Temporális logikák:
  - Formális rendszer arra, hogy kijelentések igazságának logikai időbeli változását vizsgálhassuk
  - Temporális operátorok: „mindig”, „valamikor”, „mielőtt”, „addig, amíg”, „azelőtt, hogy”, …
    (megfelelnek a jellegzetes követelmény-mintáknak)

Temporális logikák értelmezése

- Célkitűzés: Állapottér vizsgálata
- Legegyszerűbb matematikai modell: Kripke-struktúra
  - Állapotok lokális tulajdonságait címkézéssel vezettük be

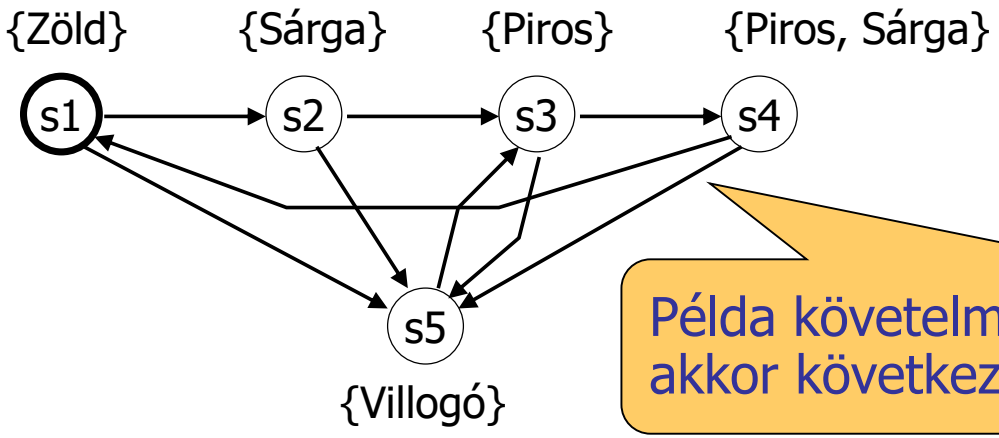
$KS = (S, R, L)$ és AP, ahol

$AP = \{P, Q, R, ...\}$ atomi kijelentések halmaza (domén-specifikus)

$S = \{s_1, s_2, s_3, ... s_n\}$ állapotok halmaza

$R \subseteq S \times S$: állapotátmeneti reláció

$L: S \rightarrow 2^{AP}$ állapotok címkézése atomi kijelentésekkel

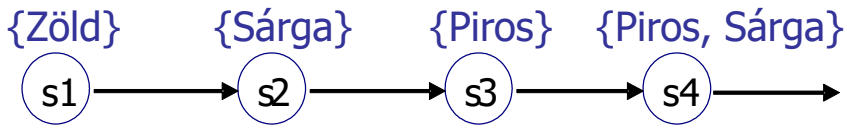


AP = {Zöld, Sárga, Piros, Villogó}
S = {s1, s2, s3, s4, s5}

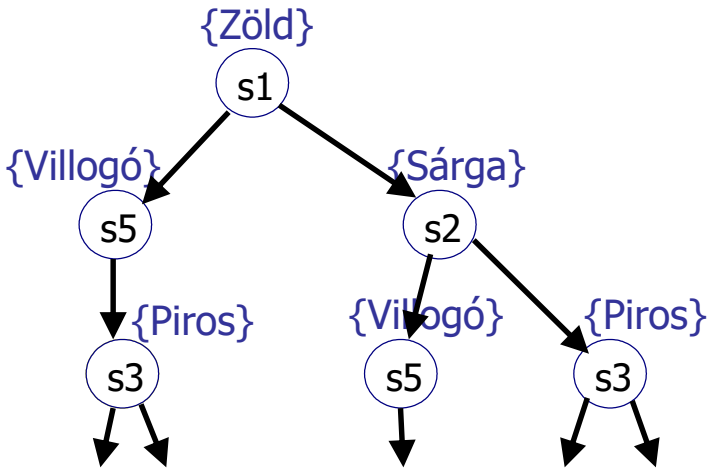
Példa követelmény: A Zöld után a Piros csak akkor következhet be, ha előtte Sárga volt.

Temporális logikák osztályozása

- Lineáris idejű:
  - A modell egy-egy végrehajtását (lefutását) tekintjük
  - Minden állapotnak egy rákövetkezője van
  - Logikai idő egy idővonal mentén (állapotsorozat)



- Elágazó idejű:
  - A modell minden lehetséges végrehajtását tekintjük
  - Az állapotoknak több rákövetkezője lehet
  - Logikai idő elágazó idővonalak mentén jelenik meg (számítási fa)

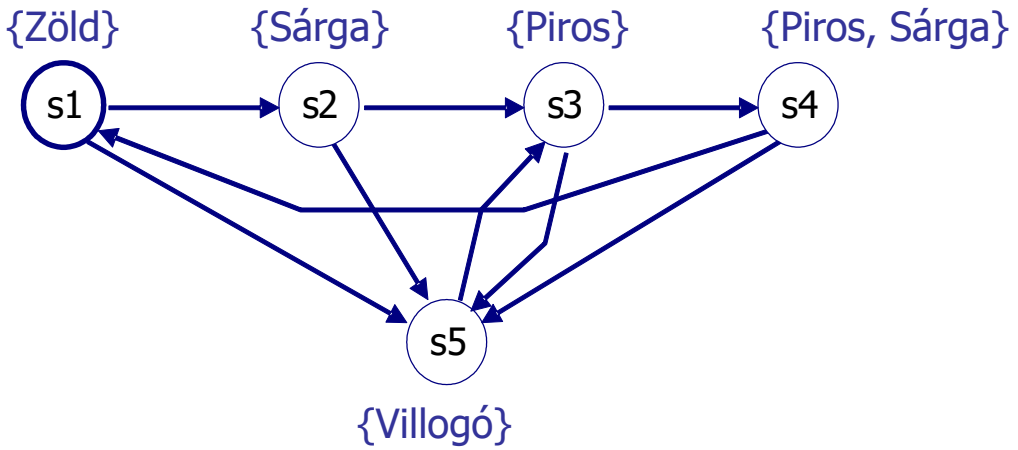


Követelmények formalizálása: Lineáris idejű temporális logikák

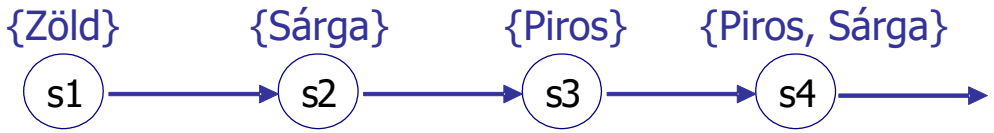
Lineáris idejű temporális logikák

- A Kripke-struktúra egy-egy útvonalán értelmezhetők
  - Egy-egy „lefutás” (pl. egy konkrét bemenet hatására)

A modell (KS):



Egy útvonal (állapotsorozat):



LTL: Egy lineáris idejű temporális logika

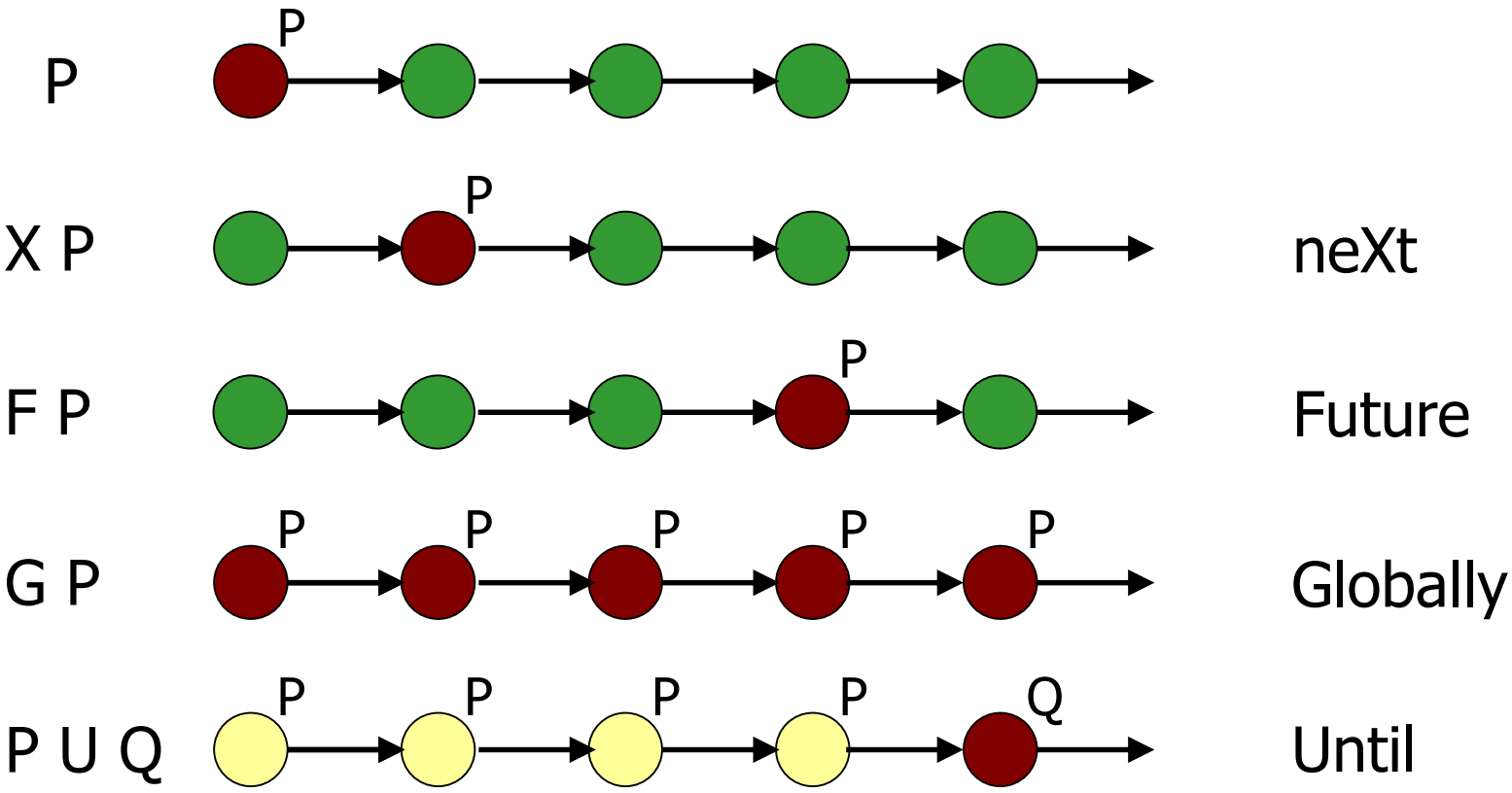
LTL: Linear Temporal Logic

Az LTL p, q, r, ... kifejezéseinek elemei:

- Atomi kijelentések (AP elemei): P, Q, ...
  Lokális tulajdonságok (címkék) állapotokhoz
- Boole logikai operátorok: $\wedge$, $\vee$, $\neg$, $\Rightarrow$
  $\wedge$: És, $\vee$: Vagy, $\neg$: Negálás , $\Rightarrow$: Implikáció
- Temporális operátorok: X, F, G, U informálisan:
  - X p: „neXt p”, a következő állapotban igaz p
  - F p: „Future p”, egy elérhető állapotban igaz p
  - G p: „Globally p”, minden elérhető állapotban igaz p
  - p U q: „p Until q”, egy elérhető állapotban igaz q, és addig minden állapotban igaz p

LTL temporális operátorok

Kripke-struktúra egy útvonalán (idővonalán):



LTL példák I.

- $p \Rightarrow F\ q$

  Ha a kiindulási állapotra p igaz, akkor valamikor q is igaz lesz.

  - Példa: Request $\Rightarrow$ F Reply
    a kezdőállapotban kiadott kérésre válasz érkezik

- $G(p \Rightarrow F\ q)$

  Minden állapotra fennáll,
  hogy ha p igaz, akkor valamikor q is igaz lesz.

  - Példa: G (Request $\Rightarrow$ F Reply)
    bármikor kiadott kérésre válasz érkezik

- $p\ U\ (q \vee r)$

  A kezdőállapotból p fennáll, amíg q vagy r igaz nem lesz.

  - Példa: Requested U (Accept $\vee$ Refuse)
    folyamatos kérést válasz vagy elutasítás követ

- $(p \wedge G(p \Rightarrow X\ p)) \Rightarrow G\ p$

  A matematikai indukció leírása (mindig teljesül)

LTL példák II.

- GF p

  Minden állapotra igaz, hogy abból tekintve a további futást valamikor p igaz lesz.

  - Nem találunk olyan állapotot, ami után p tulajdonságú állapot ne lenne elérhető.
  - Példa: GF Start
    bármely állapotból kezdőállapotba vihető a rendszer

- FG p

  Valamikor olyan állapotba kerül a rendszer, hogy azontúl p folyamatosan igaz lesz.

  - Példa: FG Normal
    a kezdeti tranziens után normál állapotokba kerül a rendszer (pl. üzemi állapotba)

Követelmények formalizálása: Példa

Adott egy klímaberendezés, aminek a következő üzemmódokat kell biztosítania:

AP={Kikapcsolva, Bekapcsolva, Elromlott, GyengénHűt, ErősenHűt, Fűt, Szellőztet}

- Egy-egy állapothoz több címke tartozhat!
  - Pl. {Bekapcsolva, Szellőztet}
- A követelmény formalizálás fázisában a teljes viselkedést (modellt) még nem feltétlenül ismerjük
  - Csak címkékkel ellátott állapotokat tételezünk fel

Példa (folytatás)

AP={Kikapcsolva, Bekapcsolva, Elromlott, GyengénHűt, ErősenHűt, Fűt, Szellőztet}

- A klímát be fogják kapcsolni:

  F (Bekapcsolva)
- A klíma előbb-utóbb mindig elromlik:

  G F (Elromlott)
- Ha a klíma elromlik, mindig megjavítják:

  G (Elromlott $\Rightarrow$ F ($\neg$Elromlott))
- Ha a klíma elromlott, nem fűt:

  G ($\neg$(Elromlott $\wedge$ Fűt))

Példa (folytatás)

AP={Kikapcsolva, Bekapcsolva, Elromlott, GyengénHűt, ErősenHűt, Fűt, Szellőztet}

- A klíma csak úgy romolhat el, ha előtte be volt kapcsolva:

  $G\ (\ X\ \text{Elromlott} \Rightarrow \text{Bekapcsolva})$

- A fűtési fázis befejezésekor szellőztetni kell:

  $G\ ((\text{Fűt} \wedge X(\neg \text{Fűt})) \Rightarrow X\ (\text{Szellőztet}))$

  de el is romolhat:

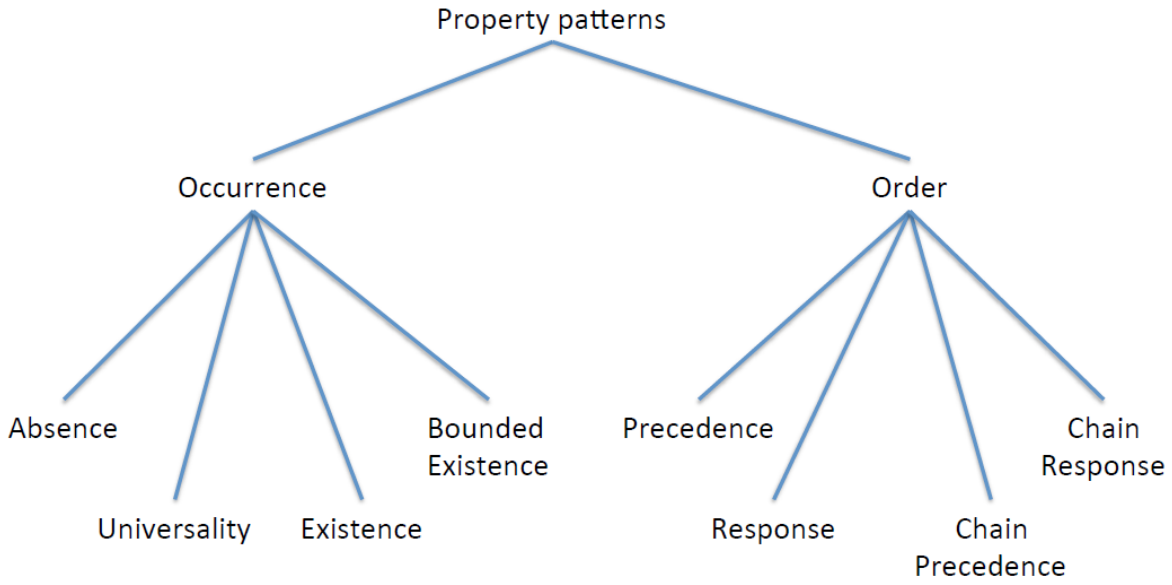
  $G\ ((\text{Fűt} \wedge X(\neg \text{Fűt})) \Rightarrow X\ (\text{Szellőztet} \vee \text{Elromlott}))$

- Szellőztetés után mindaddig nem hűthet erősen, míg egy gyenge hűtéssel nem próbálkozott:

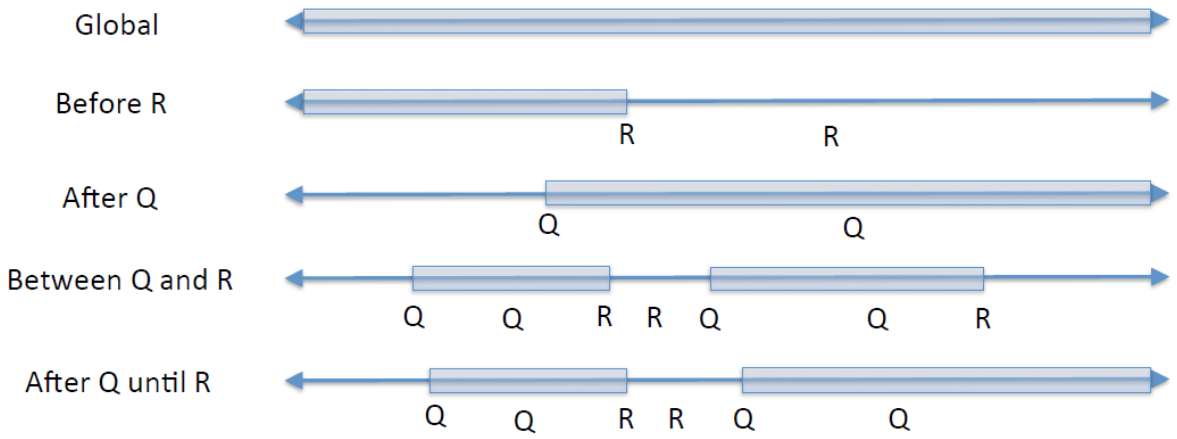
  $G\ ((\text{Szellőztet} \wedge X(\neg \text{Szellőztet})) \Rightarrow X(\neg \text{ErősenHűt}\ U\ \text{GyengénHűt}))$

Mivel kezdtük: Jellegzetes követelményminták

Minták: Sorrendi előírások



Hatókörök: További eseményekhez képest



Követelményminták formalizálása (példák)

Universality within scope	**Property in LTL**
P occurs in each step of the execution globally.	G P
P occurs in each step of the execution before Q.	F Q $\rightarrow$ (P U Q)
P occurs in each step of the execution after Q.	G(Q $\rightarrow$ G P)
P occurs in each step of the execution between Q and R.	G((Q $\wedge$ $\neg$R $\wedge$ F R) $\rightarrow$ (P U R))

Existence within scope	**Property in LTL**
P occurs in the execution globally.	F P
P occurs in the execution before Q.	$\neg$ Q WU (P $\wedge$ $\neg$ Q)
P occurs in the execution after Q.	G ($\neg$Q) $\vee$ F (Q $\wedge$ F P)
P occurs in the execution between Q and R.	G((Q $\wedge$ $\neg$R $\wedge$ F R) $\rightarrow$ ($\neg$R WU (P $\wedge$ $\neg$R)))

Szöveges követelmények formalizálása (példák)

Ha α és β igaz, akkor α-nak igaznak kell maradnia mindaddig, amíg β is igaz.

$$\mathbf{G}\big((\alpha \wedge \beta) \rightarrow (\alpha \,\mathbf{U}\, \neg\beta)\big)$$

Ha az `alarm` be van kapcsolva és `alert` történik, a `safety` kimenet váljon igazzá, amíg az `alarm` be van kapcsolva.

$$\mathbf{G}((\mathrm{alarm} = \mathrm{ON} \wedge \mathrm{alert}) \rightarrow \mathrm{X}(\mathrm{safety}\ \mathbf{U}\ \neg\mathrm{alarm}))$$

Az LTL formális szintaxisa és szemantikája

Az LTL nyelv formális kezelése

- Az eddigiek csak informális bevezetést adtak
  Kérdések vetődhetnek fel:
  - F p igaz-e, ha p rögtön az első állapotban igaz?
  - p U q igaz-e, ha q az első állapotban igaz, p nélkül?
- Az automatikus ellenőrzést is lehetővé tevő precíz megadáshoz szükséges:
  - Formális szintaxis szabályok:
    Mik az érvényes LTL kifejezések?
  - Formális szemantika szabályok ezekhez:
    Adott modellen mikor igaz egy LTL kifejezés?

LTL formális szintaxis

Az érvényes LTL kifejezések halmaza a következő szabályokkal képezhető:

- **L1**: Minden P atomi kijelentés egy kifejezés
- **L2**: Ha p és q egy-egy kifejezés, akkor $p \wedge q$ illetve $\neg p$ is
- **L3**: Ha p és q egy-egy kifejezés, akkor p U q illetve X p is

Operátorok precedenciája növekvő sorrendben:

$\equiv, \Rightarrow, \vee, \wedge, \neg$, (X,U)

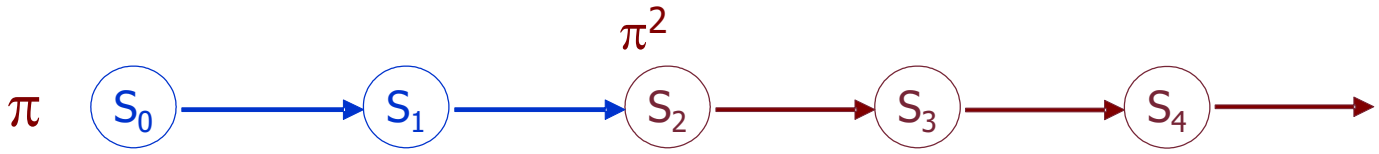
„Kimaradt” operátorok

- true minden állapotra igaz („beépített”)
  false egy állapotra sem igaz
- $p \vee q$ jelentése $\neg((\neg p)\wedge(\neg q))$
  $p \Rightarrow q$ jelentése $(\neg p) \vee q$
  $p \equiv q$ jelentése $(p \Rightarrow q)\wedge(q \Rightarrow p)$
- F p jelentése true U p
  G p jelentése $\neg F(\neg p)$
- „Mielőtt” operátor (before):
  p WB q = $\neg((\neg p)$ U q) (weak before)
  p B q = $\neg((\neg p)$ U q) $\wedge$ F q (strong before)

Informálisan:
Nem igaz, hogy nem fordul elő p a q előtt

LTL formális szemantika: Jelölések

- $M = (S, R, L)$ Kripke-struktúra
- $\pi = (s_0, s_1, s_2, \ldots)$ az M egy útvonala, ahol s_0 a kezdőállapot és $\forall i \geq 0: (s_i, s_{i+1}) \in R$
- $\pi^i = (s_i, s_{i+1}, s_{i+2}, \ldots)$ a π útvonal szuffixe i-től



- $M, \pi \models p$ jelöli:
  az M modellben a π útvonalon igaz p
- Az LTL szemantikája megadja, hogy mikor igaz egy adott útvonalon egy adott LTL kifejezés.

LTL formális szemantika

A szintaxis szabályok alapján képzett kifejezésekhez induktívan (a kifejezés felépítése szerint) megadható a formális szemantika:

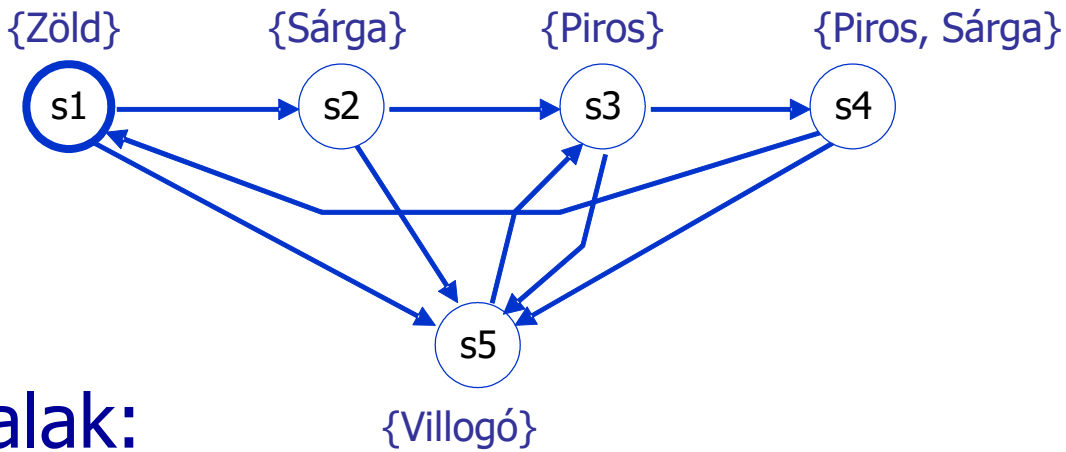
- **L1**: $M,\pi \models P$ a.cs.a. $P \in L(s_0)$
- **L2**: $M,\pi \models p \wedge q$ a.cs.a. $M,\pi \models p$ és $M,\pi \models q$
  $M,\pi \models \neg q$ a.cs.a. $M,\pi \models q$ nem igaz.
- **L3**: $M,\pi \models (p\ U\ q)$ a.cs.a.

$$\exists j \geq 0 : (\pi^j \models q \text{ valamint } \forall 0 \leq k < j : \pi^k \models p)$$

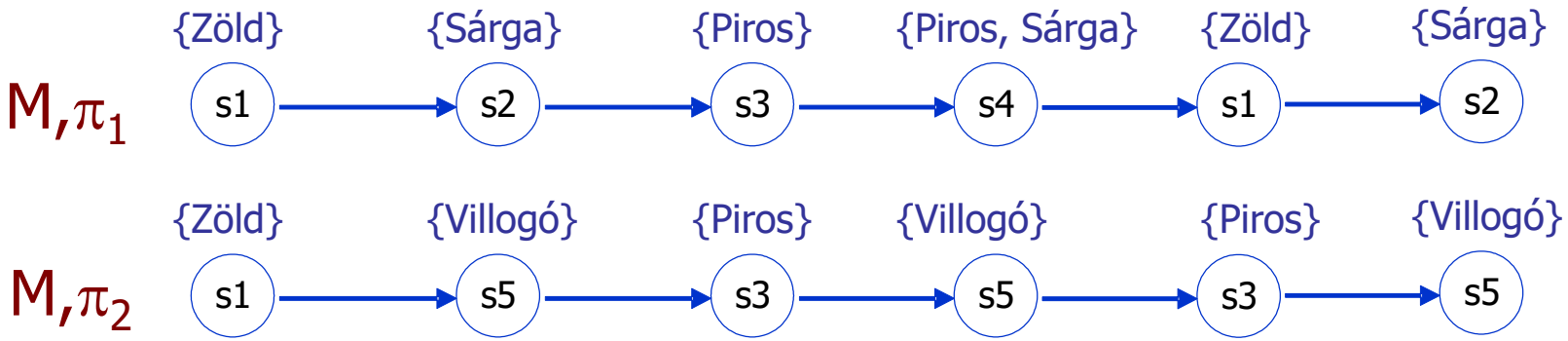
$M,\pi \models X\ p$ a.cs.a. $\pi^1 \models p$

LTL kifejezések értelmezése: Példák

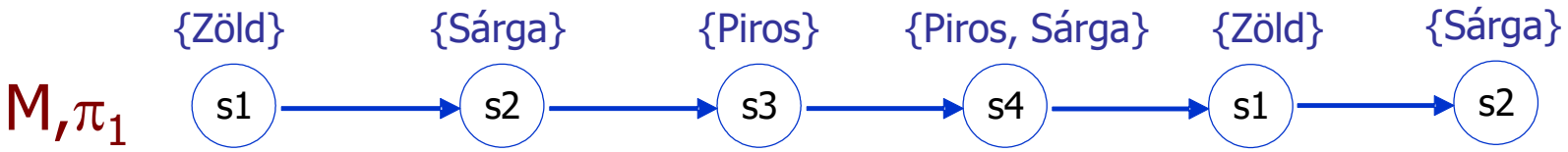
- M Kripke-struktúra:



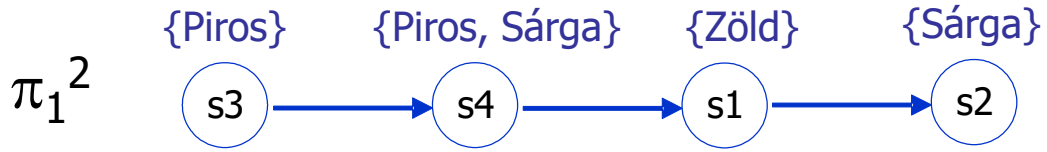
- Példa útvonalak:



Példák (folytatás)

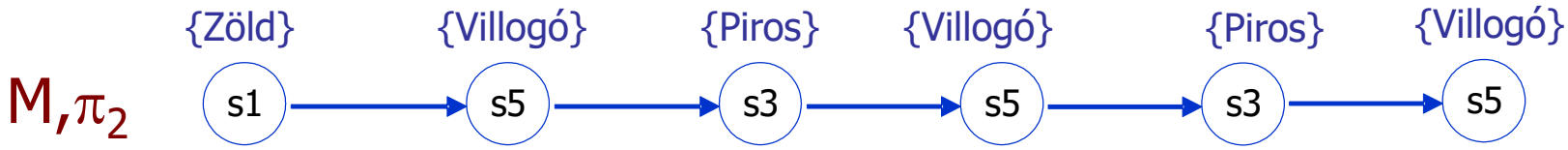


- $M,\pi_1 \models$ Zöld, mert Zöld a kezdőállapot címkéje
- $M,\pi_1 \models$ F (Piros U Zöld) igaz,
  mert van olyan szuffix,
  amire teljesül a (Piros U Zöld):

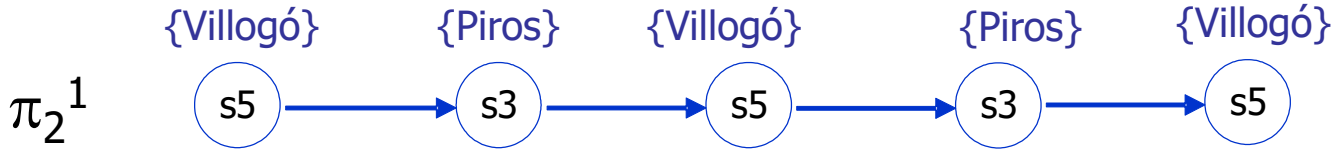


- $M,\pi_1 \models$ Piros U Zöld igaz (itt F operátor nélkül is)

Példák (folytatás)



- $M,\pi_2 \models X\ F$ (XX Piros), teljesítésének vizsgálata:
  - az első állapotból induló szuffixre legyen F (XX Piros)



  - ennek egy szuffixére legyen XX Piros
  - azaz ennek a harmadik állapota legyen Piros

LTL modell kiterjesztése LTS-re

- LTS: Labeled Transition System
- Állapotátmenetek címkézhetők egy-egy ún. akcióval, egy átmeneten csak egy akció szerepelhet
- Állapotátmenetek tulajdonságait fejezzük ki

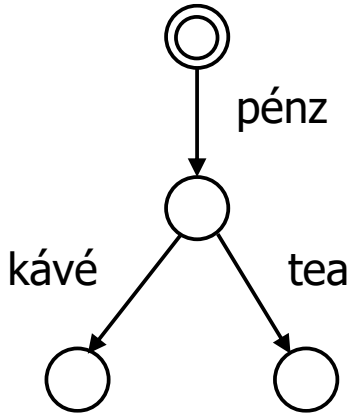
$LTS = (S, Act, \rightarrow)$, ahol

$S = \{s_1, s_2, \ldots s_n\}$ állapotok halmaza

$Act = \{a, b, c, \ldots\}$ akciók (címkék) halmaza

$\rightarrow \subseteq S \times Act \times S$ címkézett állapotátmenetek

Állapotátmenetek szokásos jelölése: $s_1 \xrightarrow{a} s_2$



LTL értelmezése LTS-en

A struktúra bővülése miatt az útvonal:

- $\pi = (s_0, a_1, s_1, a_2, s_2, a_3, \ldots)$

A szintaxis módosítása:

- **L1***: Ha a egy akció, akkor (a) egy LTL kifejezés.

A kapcsolódó szemantikai szabály:

- **L1***: $M,\pi \models (a)$ a.cs.a. $a_1 = a$
  ahol a_1 az első akció π-ben.

Ilyen módon üzenetküldéssel kommunikáló rendszerek tulajdonságai is megfogalmazhatók.

LTL összefoglalás

- Követelmények megfogalmazása
- Temporális logikák
  - Lineáris idejű temporális logikák
  - Elágazó idejű temporális logikák
- LTL
  - Operátorok
  - Formális szintaxis
  - Formális szemantika
- LTL kifejezések értelmezése
- Követelmények formalizálása