Verifikace Modelů a UPPAAL

Radek Mařík

ČVUT FEL, K13133

September 6, 2011

Obsah

Garantování správného chování systémů [Cam10]

- zvyšování složitosti softwarových systémů,
- chyby vedou ke ztrátám
  - finančním,
  - na lidských životech.
- typicky problém systémů s kritickou bezpečností
  - letadla,
  - satelity,
  - lékařská zařízení.

Cíle kladené na požadavky [Cam10]

- Demonstrace, že požadavky jsou
  - správné,
  - úplné,
  - přesné,
  - konzistentní,
  - testovatelné.

Metody zajištění kvality [Cam10]

- **Testování a Simulace** poskytuje pouze pravděpodobnostní zajištění.
- **Verifikace za běhu** . . . technika kombinující formální verifikaci s během programu.
- **Formální verifikace**. . . technika založená na formálních metodách stavějící na matematicky založených jazycích, které umožňují specifikaci a verifikaci systémů.
  - **Specifikace** . . . zapsání požadavků na systém v matematickém jazyku.
  - **Verifikace** . . . formální důkaz toho, že systém splňuje požadavky.

Princip formální verifikace [Cam10, Čer09]

Vstupy

- (matematický) model systému,
  - formální model M,
- specifikace požadavků kladených na systém
  - formule φ určité temporální logiky,

Verifikace

- Ověření, že systém splňuje specifikaci.
  - rozhodnutí, zda-li M je modelem formule φ, tj. $M \models \varphi$

Typologie formální verifikace [Cam10]

Techniky

- **Statická analýza** . . . ověření chování programu, aniž by se musel spustit.
  - **Abstraktní statická analýza** . . . založená na *abstraktní interpretaci* používající aproximační abstrakní reprezentace k ověřování přibližných vlastností složitých systémů
    - analýza ukazatelů v moderních kompilátorech.
  - **Ověřování modelů** . . . úplné procházení dosažitelných stavů programu.
  - **Omezené ověřování modelů** . . . úplné procházení dosažitelných stavů programu pouze do určité hloubky.
- **Dokazování vět** . . . nalezení důkazu vlastnosti, kdy systém i jeho vlastnosti jsou vyjádřeny jako formule v nějaké matematické logice.

Řešitelnost temporálně logických formalismů [Hol06]

Ověřování modelů

- Ptáme se, zda daný systém splňuje požadovanou vlastnost.
- Tj. pro strukturu reprezentující systém je třeba zjistit, jestli je modelem zadané formule.
- využitelné pro verifikaci existujících programů.

Splnitelnost formulí

- Problém rozhodnutí, zda existuje nějaký model zadané formule.
- využitelné při automatické syntéze programů.

Verifikace modelů [Cam10]

Princip

- budování konečného modelu systému,
- kontrola, zda požadovaná vlastnost je modelem dodržena,
- založeno na úplném prohledání stavového prostoru.

Základní vlastnosti

- manipulace s obrovskými prohledávacími prostory,
- odpověd je "ano" či "ne", v záporném případě systém poskytuje
  - protipříklad, tj. běh systému, který neodpovídá vlastnosti.
- analýza specifikace softwarových systémů.

Verifikace modelů v praxi [Cam10]

Aplikace

- ověření hardwaru (obvody),
- ověření protokolů,
- analýza specifikace softwarových systémů.

Přístupy verifikace modelů [Cam10]

Temporální verifikace modelů

- použití temporální logiky (vyjádření času),
- systémy modelovány jako přechodové systémy s konečným počtem stavů.

Automatový přístup

- specifikace i model vyjádřen jako automaty,
- oba automaty se porovnávají
  - jazyková inkluze,
  - zjemňující uspořádání,
  - pozorovací ekvivalence.

Výhody/nevýhody verifikace modelů [Cam10]

Výhody

- úplná automatizace,
- vysoká rychlost,
- možnost verifikace i částečných specifikací,
- produkuje protipříklady.

Nevýhody

- problém exploze stavů,
  - binární rozhodovací diagramy (BDD),
  - nástroje jsou schopny zvládnout systémy s $100 - 200$ stavovými proměnnými
  - je možné zvládnout systémy s 10^{120} stavy.

Rozšíření metod verifikace modelů [Bie08]

Odstraňování konečnosti

- spojité proměnné,
- spojitý čas,
- práce s pravděpodobností,
- parametrizace velikosti či počtu komponent,
- náhrada konečných automatů zásobníkovými automaty.

Temporální logika [Bie08]

Vyšetření sekvenčního či temporálního chování systému

- reaktivní, distribuované či paralelní systémy,
- A. Pnueli upozornil na tuto myšlenku jako první,

Ověřované vlastnosti

- **Bezpečnost** . . . vlastnost stanovující, že určitá chyba či katastrofický stav není dosažitelný.
  - všechny dosažitelné stavy splňují určitý invariant.
- **Živost** . . . něco jednou nastane,
- **Férovost** . . . ,

Stavový prostor [Čer09]

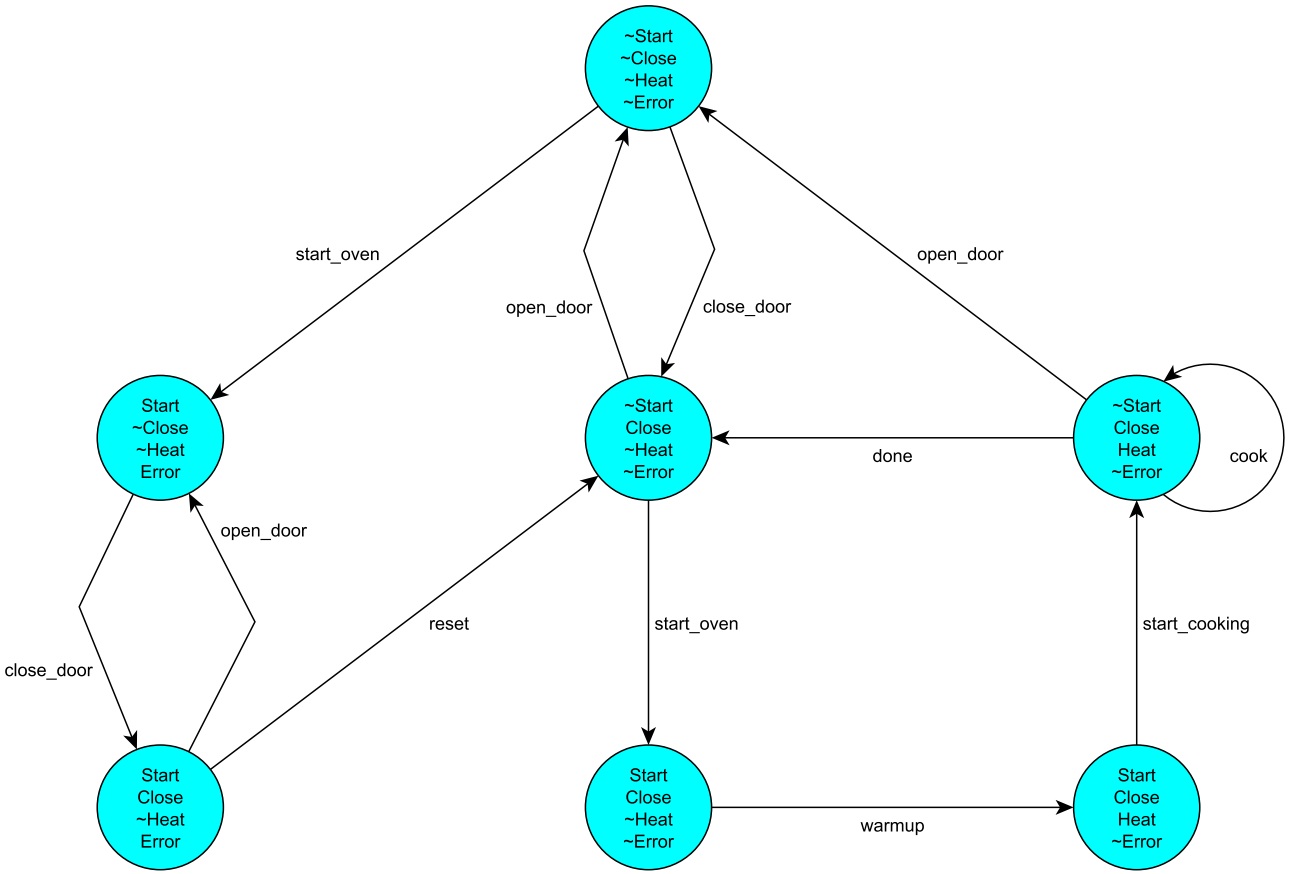
Aplikovatelné jen na konečné stavové prostory

- Verifikovat se dají pouze ty parametry modelu, které jsou specifikovány.
- Stavový prostor lze formalizovat za použití atomických výroků a Kripkeho struktury

Atomické výroky

- základní tvrzení popisující daný systém
  - výrazy,
  - konstanty,
  - predikátové symboly.
- Každý atomický výrok je algoritmicky rozhodnutelný na základě daného stavu.
- Stav . . . ohodnocení všech proměnných.

Kripkeho struktura - mikrovlná trouba [?]



Kripkeho struktura [Čer09]

Kripkeho struktura je typ nedeterministického konečného automatu.

Kripkeho struktura

- Je dána množina atomických propozic AP.
- Kripkeho struktura je trojice $(S, T, \mathcal{I})$, kde
  - S je konečná množina stavů,
  - $T \subseteq S \times S$ je přechodová relace,
  - $\mathcal{I} : S \to 2^{AP}$ je interpretace AP.

Rozšířená Kripkeho struktura

- je čtveřice $(S, T, \mathcal{I}, s_0)$, kde
  - $(S, T, \mathcal{I})$ je Kripkeho struktura,
  - s_0 je počáteční stav.

Kripkeho přechodový systém [Čer09]

Máme-li danou množinu Act akcí proveditelných programem, můžeme Kripkeho struktury rozšířit o označení přechodu.

Kripkeho přechodový systém

- je pětice $(S, T, \mathcal{I}, s_0, L)$, kde
  - $(S, T, \mathcal{I}, s_0)$ je rozšířená Kripkeho struktura,
  - $L : T \to Act$ je značkovací funkce.

Nástroj v kostce [UPP10]

Nástroj integrující prostředí

- pro modelování,
- simulaci,
- a verifikaci,
- reálných systémů.

Vývojové týmy

- **Upp**sala University, Švédsko,
- **Aal**borg University, Dánsko.

Modely systémů [UPP10]

Vlastnosti modelů

- sada nedeterministických procesů
- s konečnou řídicí strukturou a
- reálnými hodinami,
- komunikující pomocí kanálů nebo
- sdílených proměnných

Implementace [UPP10]

Hlavní návrhová kritéria

- výkonnost,
  - vyhledávací stroj *za letu*
  - symbolické techniky
- snadno použitelné.
- diagnostický záznam
  - může být generován verifikátorem a přehráván simulátorem

Dostupnost

- První verze v roce 1995
- Současná verze je 4.0.12
- grafická rozhranní jsou implementována v Java
- verifikátor je implementován v C++
- dostupné pro Linux, SunOS, MS Windows (95/98/NT/2000/XP/Vista/7)

Průmyslové studie [UPP10]

Případové studie

- audio/video protokol
  - komunikace mezi audio/video komponentami pomocí jediné sběrnice
- protokol vysílání s ohraničeným opakováním,
- protokol pro vyhnutí se kolizím
  - média založená na Eternetu
- řadič spojky automobilů,
- protokol řízení audio komponent (Philips)
- TDMA(Time Division Multiple Access) protokol mechanismu start-up
  - synchronizace 3 komunikujících stanic s libovolného počátečního stavu.

Typické aplikace

- řadiče reálného času,
- komunikační protokoly.

Komponenty systému [UPP10]

Jazyk popisu

- jazyk nedeterministických podmíněných příkazů
- jednoduché datové typy (ohraničená celá čísla, pole, atd.)
- sítě automatů s hodinami a datovými proměnnými.

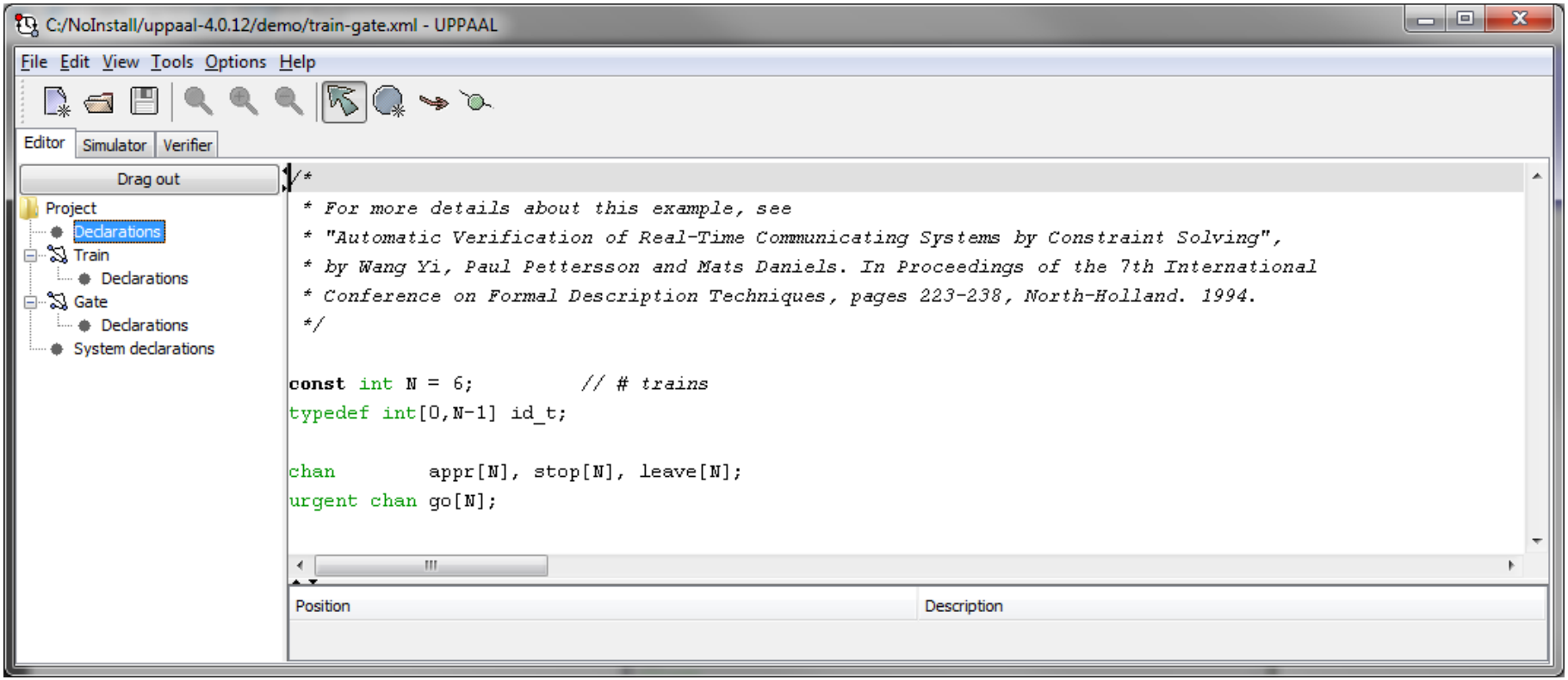
Simulátor

- vyšetřování možných dynamických běhu nějakého systému,
- detekce vad modelů před jeho verifikací,
- umožňuje analýzu záznamů běhů vedoucích k nežádaným stavům.

Verifikátor modelu

- prověření všech možností dynamického chování modelu,
- kontrola invariantů a živosti prohledáváním stavového prostoru,
- dosažitelnost symbolických stavů reprezentovaných omezeními.

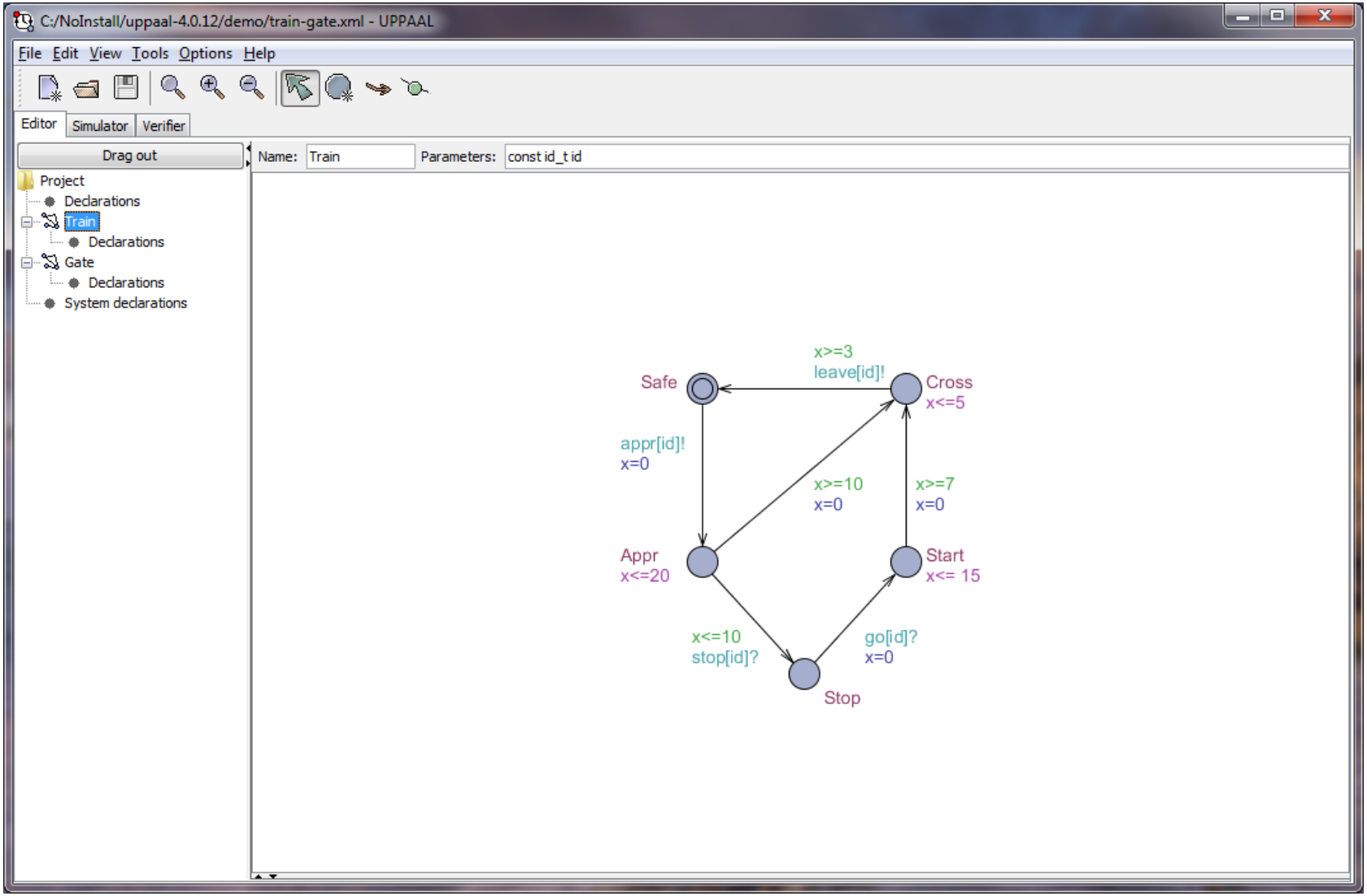
Systémový editor [UPP10]



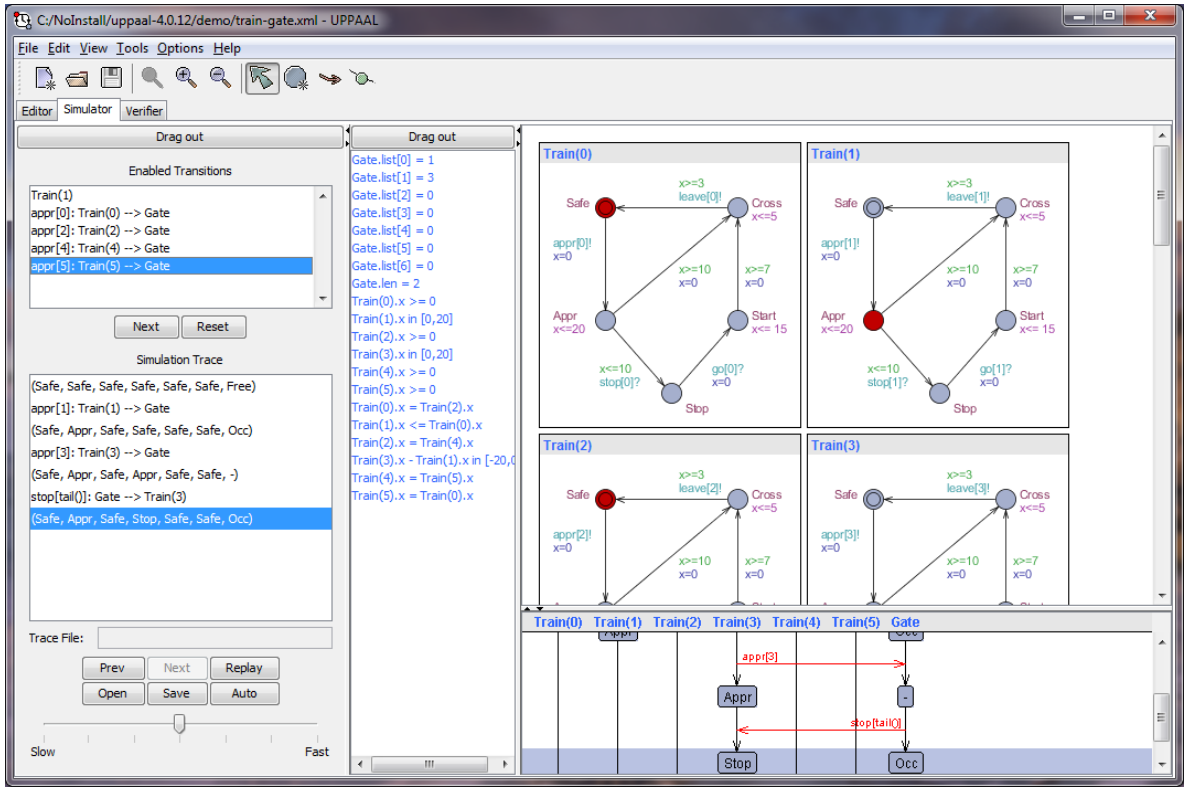
Editor

- tvorba grafického i textového popisu systémů

Grafický systémový editor [UPP10]



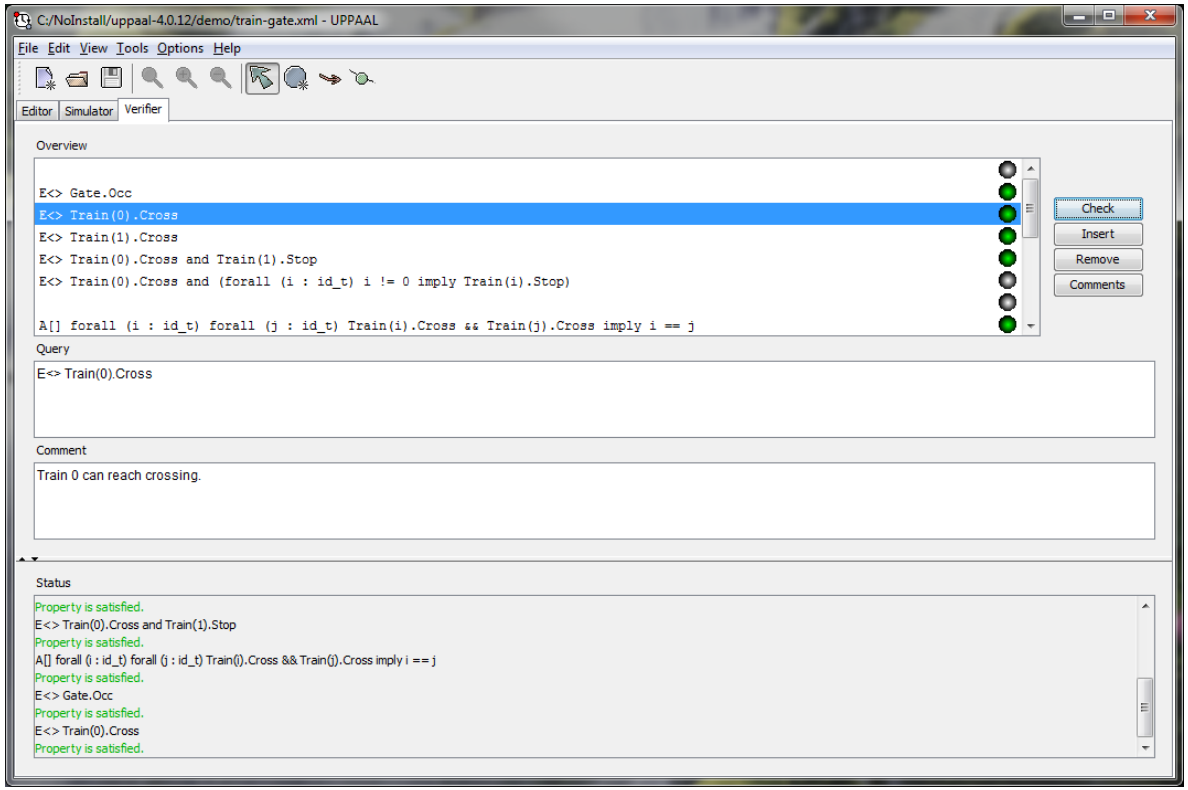
Grafický simulátor [UPP10]



Simulátor

- grafická vizualizace a záznam možného dynamického chování popisu systému,
- sekvence symbolických stavů systému,
- možnost vizualizace trasy generované verifikátorem.

Verifikátor [UPP10]



Verifikátor

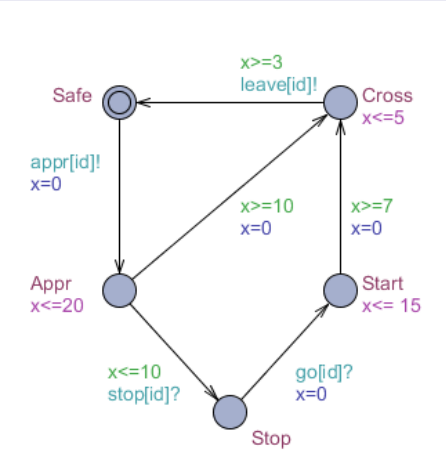
- Editor specifikace požadavků,
- Stroj verifikátoru modelu
  - automatické ověření živosti a ohraničené živosti pomocí dosažitelnosti v symbolickém stavovém prostoru.

Výchozí principy [UPP09]

Model

- Časový automaty
  - konečný stavový automat s hodinami,
  - čas je spojitý,
  - hodiny měří postup času.

Vzory procesů - Automat



- pozice a hrany,
- symbolické proměnné a konstanty jako parametry,
- lokální proměnné a hodiny,
- daný process je pak instancí vzoru.

Časový automat [BDL05]

Časový automat

- je šestice $(L, \ell_0, C, A, E, \mathcal{I})$, kde
  - L je množina pozic,
  - $\ell_0 \in L$ je počáteční pozice,
  - C je množina hodin.
  - A je množina akcí, ko-akcí a interní τ-akce,
  - $E \subseteq L \times A \times B(C) \times 2^C \times L$ je množina hran mezi pozicemi s akcí, stráží a množinou hodin, které se resetují, a
  - $\mathcal{I} : L \to B(C)$ přiřazuje invarianty k pozicím.

Příklady

- $y := 0$ . . . resetování hodin y,
- *press*? a *press*! . . . označují akci a ko-akci (zde kanálovou synchronizaci).

Hodiny časového automatu [BDL05]

Hodiny

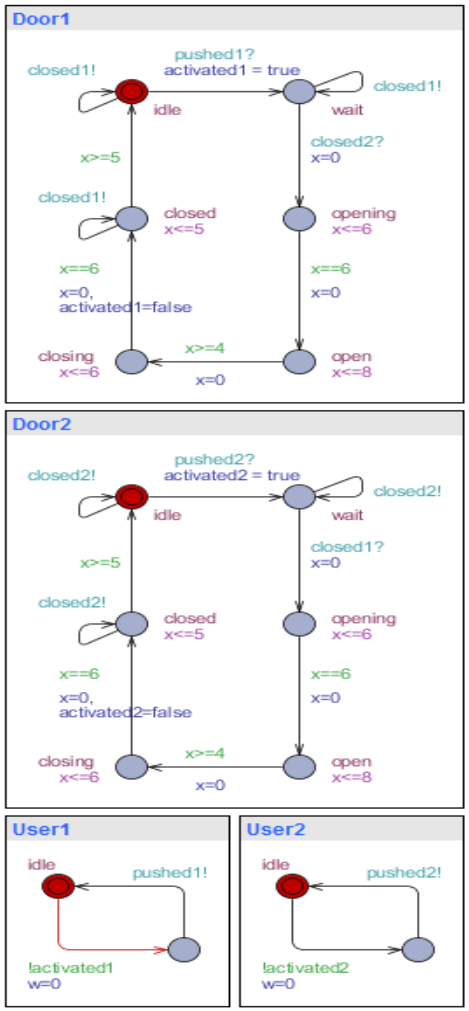
- **Ohodnocení hodin** je funkce $u : C \to \mathbb{R}_{\geq 0}$ z množiny hodin do nezáporných reálných čísel.
- Nechť $\mathbb{R}^C$ je množina všech ohodnocení hodin.
- Nechť $u_0(x) = 0$ pro všechna $x \in C$.
- Zápis $u \in \mathcal{I}(\ell)$ bude znamenat, že u splňuje $\mathcal{I}(\ell)$.
- Z daného stavu je možné provést přechod pomocí *akce* nebo *zpoždění*.

Sémantika časového automatu [BDL05]

Sémantika časového automatu

- Nechť $(L, \ell_0, C, A, E, \mathcal{I})$ je časový automat.
- Sémantika . . . přechodový systém s označením $\langle S, s_0, \rightarrow \rangle$, kde
- $S \subseteq L \times \mathbb{R}^C$ je množina stavů,
- $s_0 = (\ell_0, u_0)$ je počáteční stav,
- $\rightarrow \subseteq S \times (\mathbb{R}_{\geq 0} \cup A) \times S$ je přechodová relace taková, že
  - $(\ell, u) \xrightarrow{d} (\ell, u + d)$ if $\forall d' : 0 \leq d' \leq d \Longrightarrow u + d' \in \mathcal{I}(\ell)$
  - $(\ell, u) \xrightarrow{a} (\ell', u')$ if $\exists e = (\ell, a, g, r, \ell') \in E$ $\mid e \in g, u' = [r \mapsto 0]u, u' \in \mathcal{I}(\ell')$,
- $u + d$ zobrazuje každé hodiny $x \in C$ na hodnotu $u(x) + d$, pro $d \in \mathbb{R}_{\geq 0}$,
- $[r \mapsto 0]u$ označuje ohodnocení hodin, která mapuje každé hodiny v r na 0 a souhlasí s u nad $C \setminus r$.

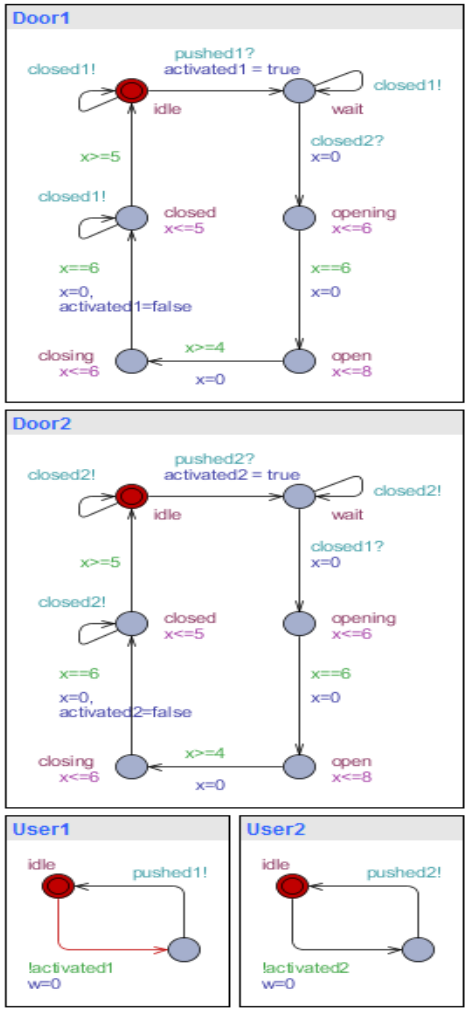
Specifikace systému [UPP09]



Systém je kompozice souběžných procesů

- každý process je modelován jako automat
- automat má množinu pozic,
- změny pozic se dějí pomocí hran/přechodů.
- stav systému je charakterizován pomocí aktuální
  - pozice každého automatu,
  - hodnot proměnných, a
  - stavu hodin.
- přechody je možné řídit pomocí stráží a synchronizací
- stráž je podmínka nad proměnnými a hodinami specifikující, kdy je přechod možný.

Komunikace procesů [UPP09]



Synchronizace

- synchronizace je mechanismus kdy dva procesy provedou současný přechod
  1. synchronizační kanál *a*,
  2. první process vyvolá přechod zprávou *a*!
  3. druhý proces provede přechod přijetím zprávy *a*?
- během přechodu je možné přiřadit do proměnných nebo resetovat hodiny.

Síť časových automatů [BDL05]

Sada automatů

- Společná množina hodin a akcí.
- n časových automatů $\mathcal{A}_i = (L_i, \ell_i^0, C, A, E_i, \mathcal{I}_i), 1 \leq i \leq n$
- poziční vektor $\bar{\ell} = (\ell_1, \cdots, \ell_n)$
- společná funkce invariantů $\mathcal{I}(\bar{\ell}) = \wedge_i \mathcal{I}_i(\ell_i)$
- $\bar{\ell}[\ell'_i/\ell_i]$ ... i-tý element ℓ_i vektoru $\bar{\ell}$ je nahrazen ℓ'_i

Sémantika sítě časových automatů [BDL05]

Síť časových automatů

- n časových automatů $\mathcal{A}_i = (L_i, \ell_i^0, C, A, E_i, \mathcal{I}_i)$
- počáteční vektor pozic $\bar{\ell}^0 = (\ell_1^0, \cdots, \ell_n^0)$
- Sémantika . . . přechodový systém s označením $\langle S, s_0, \rightarrow \rangle$, kde
- $S \subseteq (L_1 \times \cdots \times L_n) \times \mathbb{R}^C$ je množina stavů,
- $s_0 = (\bar{\ell}_0, u_0)$ je počáteční stav,
- $\rightarrow \subseteq S \times S$ je přechodová relace taková, že
  - $(\bar{\ell}, u) \xrightarrow{d} (\bar{\ell}, u + d)$ if $\forall d' : 0 \leq d' \leq d \Longrightarrow u + d' \in \mathcal{I}(\bar{\ell})$, a
  - $(\bar{\ell}, u) \xrightarrow{a} (\bar{\ell}[\ell'_i/\ell_i], u')$ if $\exists \ell_i \xrightarrow{\tau\, g\, r} \ell'_i$ $\mid u \in g, u' = [r \mapsto 0]u, u' \in \mathcal{I}(\bar{\ell}[\ell'_i/\ell_i])$,
  - $(\bar{\ell}, u) \xrightarrow{a} (\bar{\ell}[\ell'_j/\ell_j, \ell'_i/\ell_i], u')$ if $\exists \ell_i \xrightarrow{c?\, g_i\, r_i} \ell'_i$ a $\ell_j \xrightarrow{c!\, g_j\, r_j} \ell'_j$ $\mid u \in (g_i \wedge g_j), u' = [r_i \cup r_j \mapsto 0]u, u' \in \mathcal{I}(\bar{\ell}[\ell'_j/\ell_j, \ell'_i/\ell_i])$,

Typy jazyka [BDL05]

Typy

- **Konstanty** ... `const name value`, celočíselná hodnota.
- **Omezené celočíselné hodnoty** ... `int[min, max] name`, výchozí nastavení -32768 až 32768.
- **Pole** ... hodiny, kanály, konstanty, celočíselné proměnné `chan c[4]; clock a[2]; int[3,5] u[7];`.
- **Iniciátory** ... nastavení hodnot celočíselných proměnných a polí s celočíselnými proměnnými `int i := 2; int k[3] := {1, 2, 3 };`.

Speciální přechody [BDL05]

Řídicí elementy

- **Binární synchronizace** . . . `chan c`,
  hrany `c!` a `c?`, nedeterministicky pár.
- **Broadcast synchronizace** . . . `broadcast chan c`,
  jedna hrana `c!` se všemi možnými `c?`, neblokuje.
- **Urgentní synchronizace** . . . `urgent chan c`.
  - Zpoždění není dovoleno, pokud je možný přechod na urgentním kanálu.
- **Urgentní pozice** . . . Čas systému nemůže plynout, pokud se systém nachází v urgentní pozici.
- **Prováděcí pozice**
  - **Prováděcí stav** . . . alespoň jedna z pozic je prováděcí.
  - Prováděcí stav se nemůže zpožďovat.
  - Následující přechod musí zahrnovat jednu výstupní hranu vedoucí z prováděcí pozice.

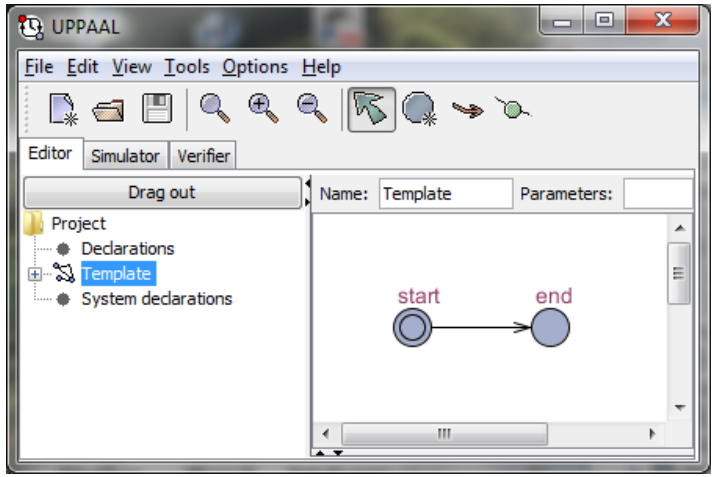
Výrazy jazyka [BDL05]

Hodiny, celočíslené proměnné a konstanty

- **Stráž** . . . výsledkem je logiká hodnota.
- **Synchronizace** . . . synchronizační návěští `Expression!` nebo `Expression?` nebo prázdné.
  Výsledkem je kanál.
  Odkazovat může celá čísla, konstanty, kanály.
- **Přiřazení** . . . výrazy oddělená čárkou.
  Odkazovat může hodiny, celočíselné proměnné, konstanty.
  Hodinám může přiřadit pouze celočíselné hodnoty.
- **Invariant** . . . Konjunkce podmínek tvaru `x<e` nebo `x<=e`, kde
  - `x` je odkaz na hodiny,
  - `e` se vyčíslí do celého čísla.

  Odkazovat může hodiny, celočíselné proměnné, konstanty.

Tvorba automatu [UPP09]



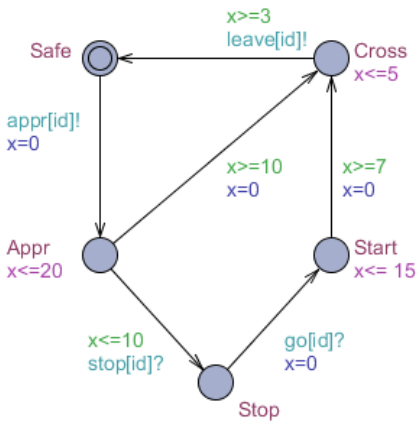
Automat

- počáteční pozice (dvojitá kružnice)
- "Add Location" pro přidání pozice
- "Selection Tool" pro pojmenování pozice
- "Add Edge" pro přidání hrany, prohnutí hran pomocí myši v okolí konců
- dolní tabulka "Position" a "Description" pro analýzu chyb

Kompozice systému [UPP09]

Systém

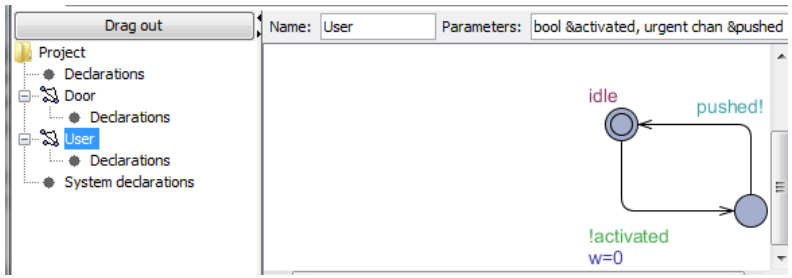
- **Systém** . . . síť paralelních časovaných automatů (procesů).
- **Proces** . . . instance parametrizovaného vzoru.

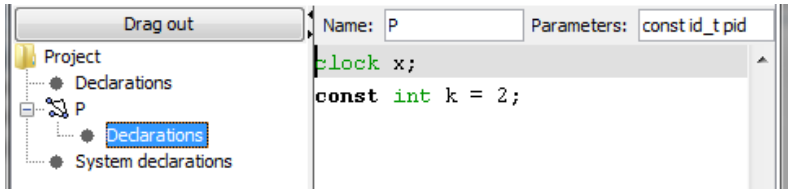


Proces

- **Pozice** . . .
  - jméno,
  - invarianty
- **Hrany** . . .
  - podmínky stráží ($x >= 7$),
  - synchronizace ($go[id]?$),
  - přiřazení ($x = 0$),

Popis vzoru (template) [UPP09]





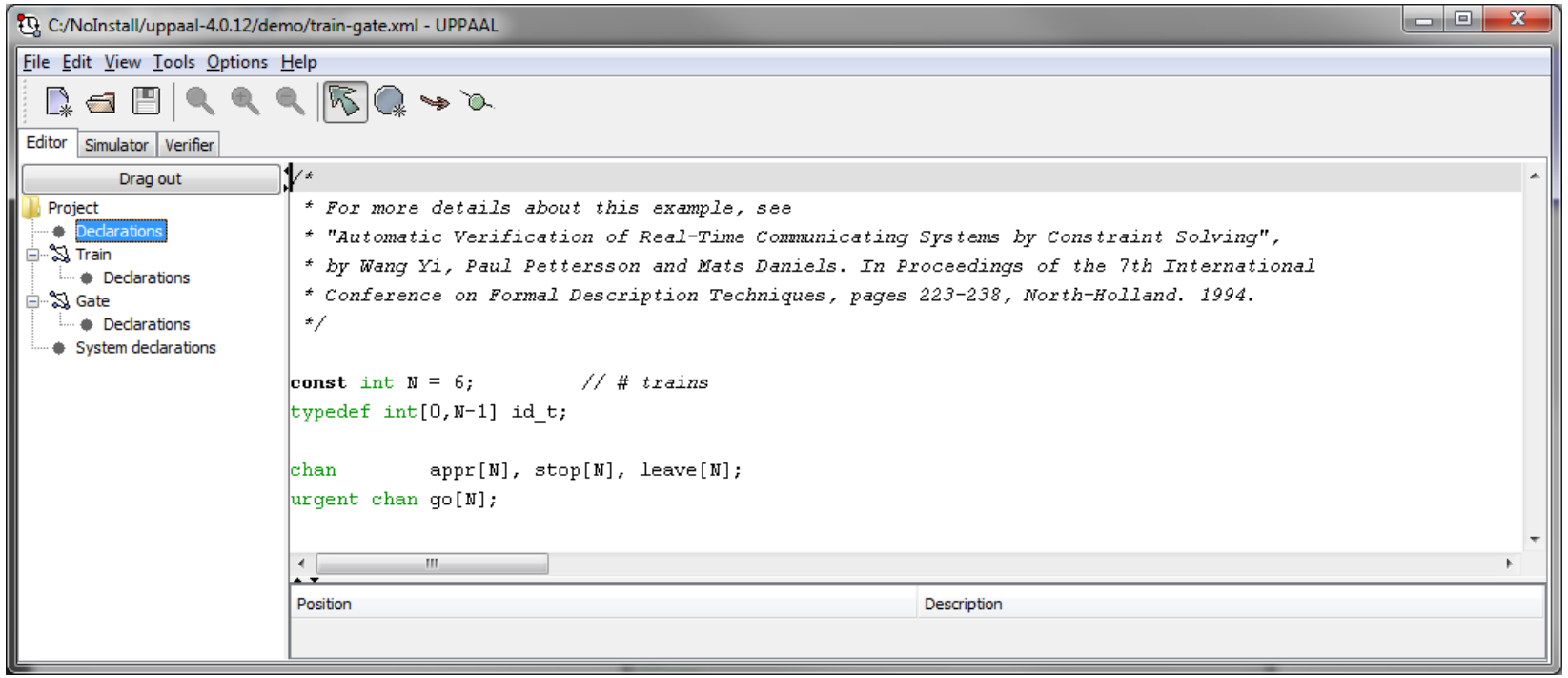
Parametrizovaný časový automat

- jméno,
- parametry,

Lokální deklarace

- proměnné,
- synchronizační kanály,
- konstanty

Popis systému [UPP09]



Globální deklarace

- globální celočíselné proměnné,
- globální hodiny,
- synchronizační kanály,
- konstanty

Definice systému [UPP09]

```
bool activated1, activated2;
urgent chan pushed1, pushed2;
urgent chan closed1, closed2;

Door1 = Door(activated1, pushed1, closed1, closed2);
Door2 = Door(activated2, pushed2, closed2, closed1);
User1 = User(activated1, pushed1);
User2 = User(activated2, pushed2);

system Door1, Door2, User1, User2;
```

Přiřazení procesů

- deklarace instancí procesu,
- vzory s úplně/částečně specifikovanými parametry,

Definice systému

- seznam procesů systému,

Literatura I

Gerd Behrmann, Alexandre David, and Kim G. Larsen.

A tutorial on UPPAAL, updated 25th october 2005.
Technical report, Department of Computer Science, Aalborg University, Denmark, October 2005.

Armin Biere.

Tutorial on model checking, modelling and verification in computer science.
In *Proc. 3rd Intl. Conf. on Algebraic Biology (AB'08). Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, volume 5147. Springer, 2008.

Alarico Campetelli.

Analysis techniques: State of the art in industry and research.
techreport TUM-I1008, Technische Universität München, April 2010.

Jiří Čermák.

Porovnání modelovacích schopností verifikačních nástrojů.
Master's thesis, Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, Brno, 2009.

Lukáš Holík.

Rozhodnutelnost v temporálních logikách.
Master's thesis, Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, Brno, 2006.

UPPAAL 4.0: Small tutorial, November 2009.

Tool environment for validation and verification of real-time systems (UPPAAL pamphlet).

http://www.it.uu.se/research/group/darts/papers/texts/uppaal-pamphlet.pdf, September 2010.