

# Biologicky motivované výpočtové modely

Mgr. Michal Kováč  
Školiteľ: doc. RNDr. Damas Gruska, PhD.

FMFI UK

17.1.2018

## 1 Prehľad problematiky

- Prehľad modelov
- P systémy

## 2 Skúmané varianty P systémov

- Sekvenčné P systémy s inhibítormi
- Sekvenčné P systémy s aktívnymi membránami
- Sekvenčné P systémy s množinami namiesto multimnožín
- Detekcia prázdnoty membrán

# Biologicky motivované výpočtové modely

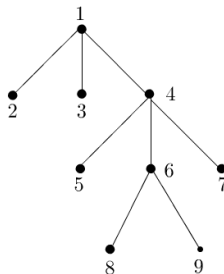
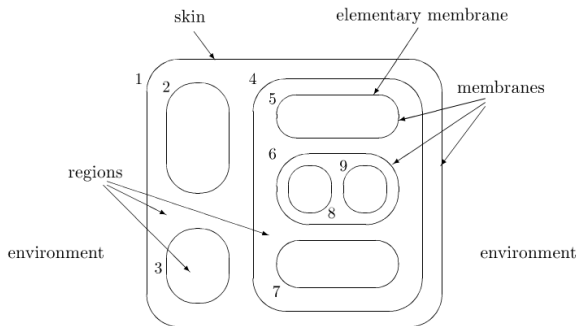
Dvojaké uplatnenie:

- reálne modely živých systémov
  - virtuálne biologické experimenty
  - verifikácia správnosti chápania ich činností
- modely na popis iných systémov

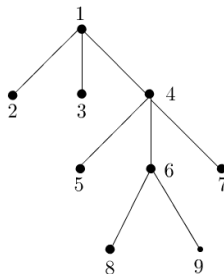
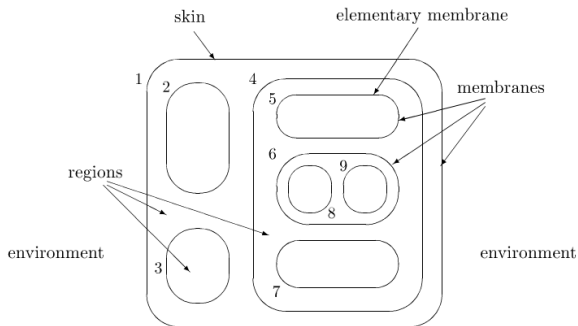
# Biologicky motivované výpočtové modely

- Neurónové siete (od 1943)
- Celulárne automaty (od 1968)
- Evolučné algoritmy (od 1954)
- L systémy (od 1968)
- Swarm Intelligence (od 1989)
- P systémy (od 1998) [Păun, 1998]
- ...

# Membránová štruktúra

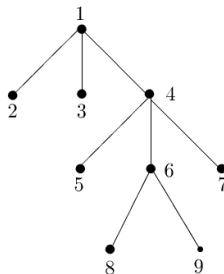
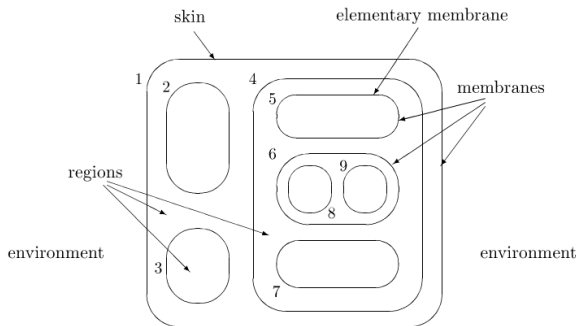


# Membránová štruktúra



- Multimnožiny

# Membránová štruktúra



- Multimnožiny
- Pravidlá

# Prepisovacie pravidlá

$u \rightarrow v$ , where

- $u \in \mathbb{N}^\Sigma$



# Prepisovacie pravidlá

$u \rightarrow v$ , where

- $u \in \mathbb{N}^{\Sigma}$
- $v = v'$  or  $v = v'\delta$ , where  $\delta \notin \Sigma$
- $v' \in \mathbb{N}^{\Sigma \times (\{here, out\} \cup \{in_j | 1 \leq j \leq m\})}$

# Variety pravidiel

$u \rightarrow v$

- Kooperatívne ( $u \in \mathbb{N}^\Sigma$ ) (PsRE [Păun, 1998])

# Variety pravidiel

$u \rightarrow v$

- Kooperatívne ( $u \in \mathbb{N}^\Sigma$ ) (PsRE [Păun, 1998])
- Nekooperatívne ( $u \in \Sigma$ ) (PsCF [Sburlan, 2005])

# Variety pravidiel

$u \rightarrow v$

- Kooperatívne ( $u \in \mathbb{N}^\Sigma$ ) (PsRE [Păun, 1998])
- Nekooperatívne ( $u \in \Sigma$ ) (PsCF [Sburlan, 2005])
- Nekooperatívne s inhibítormi ( $u \rightarrow v \mid \neg Inh, Inh \subseteq \Sigma$ ) (PsETOL [Ionescu and Sburlan, 2004])

# Variety pravidiel

$u \rightarrow v$

- Kooperatívne ( $u \in \mathbb{N}^\Sigma$ ) (PsRE [Păun, 1998])
- Nekooperatívne ( $u \in \Sigma$ ) (PsCF [Sburlan, 2005])
- Nekooperatívne s inhibítormi ( $u \rightarrow v \mid \neg Inh, Inh \subseteq \Sigma$ ) (PsETOL [Ionescu and Sburlan, 2004])
- Katalytické ( $cu \rightarrow cv, u \in \Sigma, c \in C \subseteq \Sigma$ )
  - s 2 katalyzátormi (PsRE [Freund et al., 2005])
  - s 1 katalyzátorom (otvorený problém)
  - s 1 katalyzátorom a inhibítormi (PsRE [Ionescu and Sburlan, 2004])

# Výpočet a jazyk

- Krok výpočtu
  - Sekvenčný
  - Paralelný
  - Maximálne paralelný

# Výpočet a jazyk

- Krok výpočtu
  - Sekvenčný
  - Paralelný
  - Maximálne paralelný
- Jazyk
  - Generatívny mód: postupnosť objektov vypustených do okolitého prostredia

# Výpočet a jazyk

- Krok výpočtu
  - Sekvenčný
  - Paralelný
  - Maximálne paralelný
- Jazyk
  - Generatívny mód: postupnosť objektov vypustených do okolitého prostredia
  - Akceptačný mód: daná konfigurácia je akceptovaná, ak sa systém vie dostať do stavu, kde sa už nedá použiť žiadne pravidlo



# Sekvenčné P systémy

- Maximálny paralelizmus vs. sekvenčný mód

# Sekvenčné P systémy

- Maximálny paralelizmus vs. sekvenčný mód
- Sekvenčné P systémy s kooperatívnymi pravidlami (VASS [Ibarra et al., 2005])

# Sekvenčné P systémy

- Maximálny paralelizmus vs. sekvenčný mód
- Sekvenčné P systémy s kooperatívnymi pravidlami (VASS [Ibarra et al., 2005])
  - s prioritami (RE [Ibarra et al., 2005])

# Sekvenčné P systémy

- Maximálny paralelizmus vs. sekvenčný mód
- Sekvenčné P systémy s kooperatívnymi pravidlami (VASS [Ibarra et al., 2005])
  - s prioritami (RE [Ibarra et al., 2005])
  - s aktívnymi membránami (RE [Ibarra et al., 2005])

# Sekvenčné P systémy

- Maximálny paralelizmus vs. sekvenčný mód
- Sekvenčné P systémy s kooperatívnymi pravidlami (VASS [Ibarra et al., 2005])
  - s prioritami (RE [Ibarra et al., 2005])
  - s aktívnymi membránami (RE [Ibarra et al., 2005])
  - s **inhibítormi** (RE [Kováč, 2014])

# Sekvenčné P systémy

- Maximálny paralelizmus vs. sekvenčný mód
- Sekvenčné P systémy s kooperatívnymi pravidlami (VASS [Ibarra et al., 2005])
  - s prioritami (RE [Ibarra et al., 2005])
  - s aktívnymi membránami (RE [Ibarra et al., 2005])
  - s **inhibítormi** (RE [Kováč, 2014])

# Sekvenčné P systémy s inhibítormi

- Kováč (2014). Using Inhibitors to Achieve Universality of Sequential P Systems.  
In *Electronic Proceedings of CiE 2014*

# Prehľad simulácie pre akceptačný mód

- Simulácia registrového stroja



# Prehľad simulácie pre akceptačný mód

- Simulácia registrového stroja
- Obsah registra  $x$  sa reprezentuje početnosťou objektu  $x$
- Objekt pre každú inštrukciu

# Prehľad simulácie pre akceptačný mód

- Simulácia registrového stroja
- Obsah registra  $x$  sa reprezentuje početnosťou objektu  $x$
- Objekt pre každú inštrukciu
- SUB inštrukcia sa simuluje pomocou inhibítora
  - $i : SUB(x, j, k)$
  - $ix \rightarrow j$
  - $i \rightarrow k|_{\neg x}$

## Prehľad simulácie pre generatívny mód

- Simulácia maximálne paralelného P systému  $\Pi_1$  pomocou sekvenčného P systému s inhibítormi  $\Pi_2$ .

## Prehľad simulácie pre generatívny mód

- Simulácia maximálne paralelného P systému  $\Pi_1$  pomocou sekvenčného P systému s inhibítormi  $\Pi_2$ .
- Každý maximálne paralelný krok  $\Pi_1$  simulujeme sekvenčnými krokmi  $\Pi_2$ .

## Prehľad simulácie pre generatívny mód

- Simulácia maximálne paralelného P systému  $\Pi_1$  pomocou sekvenčného P systému s inhibítormi  $\Pi_2$ .
- Každý maximálne paralelný krok  $\Pi_1$  simulujeme sekvenčnými krokmi  $\Pi_2$ .
- Produkty si označujeme, aby neboli použité, kým neskončí daný maximálne paralelný krok.

## Prehľad simulácie pre generatívny mód

- Simulácia maximálne paralelného P systému  $\Pi_1$  pomocou sekvenčného P systému s inhibítormi  $\Pi_2$ .
- Každý maximálne paralelný krok  $\Pi_1$  simulujeme sekvenčnými krokmi  $\Pi_2$ .
- Produkty si označujeme, aby neboli použité, kým neskončí daný maximálne paralelný krok.
- Pomocou inhibítorov zistíme moment, kedy sa už v  $\Pi_2$  nedá aplikovať žiadne pravidlo, aby sa mohol simulovať ďalší maximálne paralelný krok.

# Sekvenčné P systémy s aktívnymi membránami

- Bez limitu počtu aplikovaní pravidiel na vytvorenie membrány (RE [Ibarra, 2005])

# Sekvenčné P systémy s aktívnymi membránami

- Bez limitu počtu aplikovaní pravidla na vytvorenie membrány (RE [Ibarra, 2005])
- Kováč, M. (2015). [Decidability of termination problems for sequential p systems with active membranes.](#)  
In Beckmann, A., Mitrană, V., and Soskova, M., editors, *Evolving Computability*, volume 9136 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 236–245. Springer International Publishing



# Problém zastavenia

- Problém zastavenia je definovaný pre deterministické modely

# Problém zastavenia

- Problém zastavenia je definovaný pre deterministické modely
- Zovšeobecnenie: Existencia (ne)konečného výpočtu

# Existencia nekonečného výpočtu

- Graf dosiahnuteľnosti

# Existencia nekonečného výpočtu

- Graf dosiahnuteľnosti
- Čiastočné usporiadanie  $\leq$ :
  - $C_1 \leq C_2 \Rightarrow$  každé pravidlo v  $C_1$  je aplikovateľné v  $C_2$ .

# Existencia nekonečného výpočtu

- Graf dosiahnuteľnosti
- Čiastočné usporiadanie  $\leq$ :
  - $C_1 \leq C_2 \Rightarrow$  každé pravidlo v  $C_1$  je aplikovateľné v  $C_2$ .
  - Pre každú nekonečnú postupnosť konfigurácií existuje  $C_1, C_2$ :  
 $C_1 \rightarrow^* C_2$  a  $C_1 \leq C_2$ .

# Existencia nekonečného výpočtu

- Graf dosiahnuteľnosti
- Čiastočné usporiadanie  $\leq$ :
  - $C_1 \leq C_2 \Rightarrow$  každé pravidlo v  $C_1$  je aplikovateľné v  $C_2$ .
  - Pre každú nekonečnú postupnosť konfigurácií existuje  $C_1, C_2$ :  
 $C_1 \rightarrow^* C_2$  a  $C_1 \leq C_2$ .
- Dicksonova lemma: Pre každú nekonečnú postupnosť  $n$ -tíc nad  $\mathbb{N}$   $\{a_i\}_{i=0}^{\infty}$  existujú  $i < j$ :  $a_i \leq a_j$

# Algoritmus rozhodujúci existenciu nekonečného výpočtu

- Traverzuj graf dosiahnuteľnosti
- Dosiahnutá konfigurácia  $C_2$ , taká, že na ceste z počiatkovej konfigurácie existuje  $C_1 \leq C_2 \Rightarrow \text{YES}$ .
- Ak traverzovanie skončilo  $\Rightarrow \text{NO}$ .

## Existencia konečného výpočtu

- Pre daný P systém  $\Pi$  a danú konfiguráciu  $C$  vieme zostrojiť P systém  $\Pi'$  :  $\exists$  konečný výpočet  $\Pi' \Leftrightarrow C$  je dosiahnuteľná v  $\Pi$ .



## Sekvenčné P systémy s množinami namiesto multimnožín

- Kováč and Gruska (2015). *Sequential p systems with active membranes working on sets.*

In Zbigniew Suraj, L. C., editor, *Proceedings of the 24th International Workshop on Concurrency, Specification and Programming*, pages 247–257

## Nevýhody používania multimnožín

- Nakoľko realistické je reprezentovať presný počet objektov?
- Nepraktická analýza kvôli veľkosti stavového priestoru

# P systémy s množinami objektov

- Alhazov [Alhazov, 2006]: počty objektov sa ignorujú

## P systémy s množinami objektov

- Alhazov [Alhazov, 2006]: počty objektov sa ignorujú
  - Maximálny paralelizmus  $\Rightarrow$  determinizmus.

## P systémy s množinami objektov

- Alhazov [Alhazov, 2006]: počty objektov sa ignorujú
  - Maximálny paralelizmus  $\Rightarrow$  determinizmus.
  - Ekvivalencia s konečnosťavými automatmi.

## P systémy s množinami objektov

- Alhazov [Alhazov, 2006]: počty objektov sa ignorujú
  - Maximálny paralelizmus  $\Rightarrow$  determinizmus.
  - Ekvivalencia s konečnosťovými automatmi.
  - S aktívnymi membránami je model univerzálny.

## P systémy s množinami objektov

- Alhazov [Alhazov, 2006]: počty objektov sa ignorujú
  - Maximálny paralelizmus  $\Rightarrow$  determinizmus.
  - Ekvivalencia s konečnostavovými automatmi.
  - S aktívnymi membránami je model univerzálny.
- Kleijn, Koutny [Kleijn and Koutny, 2011]: “min-enabled” computational step (= sekvenčný mód)

## P systémy s množinami objektov

- Alhazov [Alhazov, 2006]: počty objektov sa ignorujú
  - Maximálny paralelizmus  $\Rightarrow$  determinizmus.
  - Ekvivalencia s konečnostavovými automatmi.
  - S aktívnymi membránami je model univerzálny.
- Kleijn, Koutny [Kleijn and Koutny, 2011]: “min-enabled” computational step (= sekvenčný mód)
  - Ekvivalencia s konečnostavovými automatmi.



## P systémy s množinami objektov

- Alhazov [Alhazov, 2006]: počty objektov sa ignorujú
  - Maximálny paralelizmus  $\Rightarrow$  determinizmus.
  - Ekvivalencia s konečnostavovými automatmi.
  - S aktívnymi membránami je model univerzálny.
- Kleijn, Koutny [Kleijn and Koutny, 2011]: “min-enabled” computational step (= sekvenčný mód)
  - Ekvivalencia s konečnostavovými automatmi.
- Vlastnosti:
  - Pravidlá bez konfliktu (objekty sa môžu zúčastniť ako reaktanty súčasne vo viacerých pravidlách).
  - Ak je objekt použitý aspoň v jednom pravidle ako reaktant, bude spotrebovaný.

# Sekvenčné P systémy s množinami objektov a aktívnymi membránami

- $\Pi = (\Sigma, C_0, R_1, \dots, R_m)$

# Sekvenčné P systémy s množinami objektov a aktívnymi membránami

- $\Pi = (\Sigma, C_0, R_1, \dots, R_m)$
- $C = (T, l, c)$ 
  - $l : V(T) \rightarrow \{1, \dots, m\}$
  - $c : V(T) \rightarrow 2^\Sigma$

# Sekvenčné P systémy s množinami objektov a aktívnymi membránami

- $\Pi = (\Sigma, C_0, R_1, \dots, R_m)$
- $C = (T, I, c)$ 
  - $I : V(T) \rightarrow \{1, \dots, m\}$
  - $c : V(T) \rightarrow 2^\Sigma$
- Pravidlá
  - $u \rightarrow w$
  - $u \rightarrow w\delta$
  - $u \rightarrow [{}_j v_1]_j v_2,$   
kde  $u \in \Sigma, |u| \geq 1, v_1, v_2 \in \mathbb{N}$  a  $w \in (\Sigma \times \{\cdot, \uparrow, \downarrow\})$

# Iné spôsoby vytvárania membrány

- Problémy pôvodnej definície:
  - Vytváranie membrány, ktorá už existuje
  - Posielanie objektu do neexistujúcej membrány

# Iné spôsoby vytvárania membrány

- Problémy pôvodnej definície:
  - Vytváranie membrány, ktorá už existuje
  - Posielanie objektu do neexistujúcej membrány
- Inject-or-create

# Iné spôsoby vytvárania membrány

- Problémy pôvodnej definície:
  - Vytváranie membrány, ktorá už existuje
  - Posielanie objektu do neexistujúcej membrány
- Inject-or-create
- Wrap-or-create

# Simulácia registrového stroja

	membrány	čas
original	$O(n)$	$O(n)$



# Simulácia registrového stroja

	membrány	čas
original	$O(n)$	$O(n)$
original	$O(\log(n))$	$O(\log(n))$

# Simulácia registrového stroja

	membrány	čas
original	$O(n)$	$O(n)$
original	$O(\log(n))$	$O(\log(n))$
inject-or-create	$O(\log(n))$	$O(\log(n))$

# Simulácia registrového stroja

	membrány	čas
original	$O(n)$	$O(n)$
original	$O(\log(n))$	$O(\log(n))$
inject-or-create	$O(\log(n))$	$O(\log(n))$
wrap-or-create	$O(n)$	$O(1)$

# Detekcia prázdnoty membrán

- Objekty vyhýbajúce sa prázdny membránam

# Detekcia prázdnoty membrán

- Objekty vyhýbajúce sa prázdny membránam
- Mutovanie objektov pri poslaní do prázdnej membrány

# Detekcia prázdnoty membrán

- Objekty vyhýbajúce sa prázdny membránam
- Mutovanie objektov pri poslaní do prázdnej membrány
- Objekt repretetujúci vákuum

Ďakujem za pozornosť

## Vyjadrenia k posudkom

- Štandardnou motiváciou pre skúmanie týchto modelov je potenciál vysokého paralelizmu. Práca je príliš zameraná na sekvenčný mód, ktorý úplne eliminuje potenciál tohto modelu.



## Vyjadrenia k posudkom

- Štandardnou motiváciou pre skúmanie týchto modelov je potenciál vysokého paralelizmu. Práca je príliš zameraná na sekvenčný mód, ktorý úplne eliminuje potenciál tohto modelu.
- V práci sa hovorí o slabých rozšíreniach sekvenčných P systémov s čiastočnými výsledkami. Aký je v uvedenom smere pokrok od podania dizertácie?