



Úvod do modelovania a simulácie

Prednáška č. 1

Modelovanie a simulácia
doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

Modelovanie a simulácia

- Venuje sa štúdiu skúmaných objektov
 - existujúcich
(stanica, lietadlo, podnik, atómový reaktor, auto, ...)
 - takých, ktoré by mohli existovať
(stanica po rekonštrukcii, atómový reaktor po výbuchu, projektovaná elektráreň, ...)

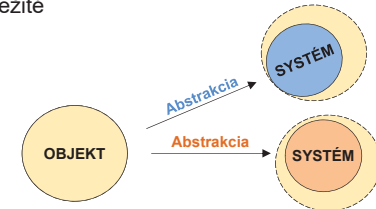


Modelovanie a simulácia
© doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

2

Systém

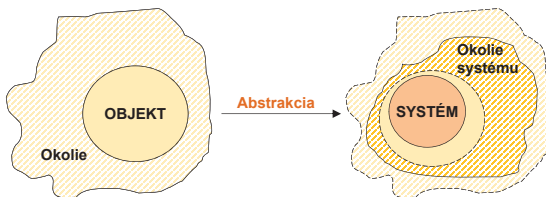
- Abstrakcia, ktorá zanedbáva isté vlastnosti objektu, ktoré nie sú z pohľadu konkrétneho typu skúmania dôležité



Modelovanie a simulácia
© doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

3

Systém a okolie systému



Modelovanie a simulácia
© doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

4

Statické a dynamické systémy

- Statický systém
 - pri vymedzovaní systému abstrahujeme od významu času
- Dynamický systém
 - čas nezanedbávame
 - množina okamihov, keď dynamický systém existuje sa nazýva (časovou) **existenciou dynamického systému**



Modelovanie a simulácia
© doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

5

Prvky systému (entity)

1.
 - Permanentné prvky (sú v systéme počas celej jeho existencie)
 - Temporálne prvky
 - Endogénne (vznikajúce priamo v systéme)
 - Exogénne (vznikajúce mimo systému)
2.
 - Stabilné prvky
 - Mobilné prvky (pohybujúce sa)
3.
 - Obsluhované prvky (zákazníci)
 - Obsluhujúce prvky (zdroje obsluhy)



Modelovanie a simulácia
© doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

6

Atribúty prvkov systému

- Prvky systému majú svoje vlastnosti (**atribúty**)
 - štandardné**
reálne čísla, booleovské hodnoty, texty, ...
 - referenčné**
odkazy na iné prvky, definujú väzby/relácie medzi prvkami

Stav dynamického systému v čase **t** je určený prvkami, ktoré sú v čase **t** v systéme prítomné a hodnotami ich atribútov v tomto čase.

Skúmanie systému

AKO?

Experimenty so skúmaným systémom

- Pri istých úlohách to je možné

Napríklad:

- Nastavenie priorít pre procesy v počítači
- Organizácia práce pokladní na diaľnici
- Crash testy

- Výhodné ale ťažko použiteľné v praxi

(určite viem, že skúmam správnu vec, no je málo situácií, kedy sa dá experimentovať s reálnym systémom)

Prečo nie so skúmaným systémom?

- Nedostupnosť**
(systém ešte nemusí existovať, predpovede počasia)
- Čas**
(napr. príliš dlho/krátko trvajúce procesy)
- Cena**
(príliš veľké náklady)
- Bezpečnosť**
(napr. jadrová elektrárňa, vodné dielo)
- Etika**
(„pokusy na ľuďoch“)

Modelovanie

Ak nie so skúmaným systémom, tak ako?

- Vytvorme si validný **model** skúmaného systému
- Experimentujeme s týmto modelom
- Výsledky experimentov s modelom môžeme aplikovať späť na skúmaný systém

Modelovanie je výskumná technika/metóda, podstatou ktorej je náhrada skúmaného systému (originálu) jeho modelujúcim systémom (modelom), za účelom získať pomocou pokusov (experimentov) s modelom informácie o origináli

Model

- Analógia medzi dvoma systémami:
modelovaným a modelujúcim.

Každému prvku P_O originálu je priradený prvok P_M modelujúceho systému, každému atribútu a_O prvku P_O je priradený atribút a_M prvku P_M , pričom pre hodnoty atribútov a_O a a_M je daná nejaká relácia.

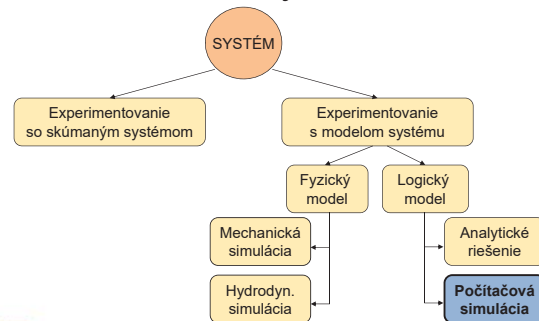
Modelovaný systém \approx originál

Modelujúci systém \approx model

Modelujúce systémy (Modely)

- Fyzické modely
 - trenažér v autoškole
 - trenažér kontrolnej miestnosti jadrovej elektrárne
 - model vodného diela
 - model auta vo vzduchovom tuneli
- Logické (matematické) modely
 - využitie metód operačnej analýzy (nevhodné pre komplikovanejšie systémy)
 - počítačový simulačný model

Štúdium systémov



Simulácia

- Modelovanie pri ktorom je použitý simulačný model systému

Simulácia je výskumná technika/metóda, ktorej podstatou je náhrada skúmaného **dynamického systému (originálu)** jeho **simulátorom**, s ktorým sa experimentuje s cieľom získať informácie o pôvodnom skúmanom dynamickom systéme.

Simulačný model

1. Modelovaný systém (originál) i jeho modelujúci systém sú **dynamické systémy**.
2. Existuje zobrazenie τ existencie originálu do existencie modelujúceho systému.
Ak t_1 je časový okamih, v ktorom existuje modelovaný systém O , je mu priradený okamih $\tau(t_1) = t_2$, v ktorom existuje modelujúci systém M . Teda zobrazením τ sa aj stavu $^OS_1(t_1)$ systému O priradí stav $^MS_2(t_2)$ systému M .

Simulačný model (pokr.)

3. Medzi stavmi $^OS_1(t_1)$ a $^MS_2(t_2)$ sú splnené požiadavky na vzťahy medzi prvkami a ich atribútmi.

Každému prvku P_O originálu je priradený prvok P_M modelujúceho systému, každému atribútu a_O prvku P_O je priradený atribút a_M prvku P_M , pričom pre hodnoty atribútov a_O a a_M je daná nejaká relácia.

Simulačný model (pokr.)

4. Zobrazenie τ je neklesajúce.
Ak nastane stav OS_1 originálu pred nejakým jeho iným stavom OS_2 , tak stav MS_1 , ktorý zodpovedá v modelujúcom systéme stavu OS_1 nastane pred stavom MS_2 , ktorý zodpovedá stavu OS_2 (alebo môžu nastať súčasne).
[Nutnosť dodržiavať v modelujúcom systéme vzťahy kauzality platné v origináli.]

Simulujúci systém \approx simulačný model = simulátor

Oblasti využitia simulácie

- Doprava
 - [Logistické terminály](#)
 - [Cestná doprava](#)
 - [Simulácia pohybu chodcov \(PedSim\)](#)
- Logistika



Oblasti využitia simulácie

- [Obslužné systémy](#)
- Ekonomika
- [Výrobné systémy](#)
- Počítačové a telekomunikačné siete



Oblasti využitia simulácie

- [Vojenstvo](#)
- [Medicína](#)
- [Zdravotníctvo](#)
- [Fyzika](#)
- Predpoveď počasia – Aladin (SHMÚ)
- Chémia



Oblasti využitia simulácie

- Vzdelávanie, školenie
 - [Simulátory strojov a zariadení](#)
- Trenažéry dopravných prostriedkov
- Tréning krízových situácií
- Výučbové simulácie



Oblasti využitia simulácie

- Krízový manažment
 - [Tréning požiarneho zásahu](#)
 - [Simulácia zemetrasenia](#)
 - [Simulácia evakuácie cestujúcich](#)



Výhody simulácie

- Vykonávanie kontrolovaných experimentov
- Skúmanie komplexných systémov
- Nízka cena
- Kompresia a expanzia času
- Neovplyvňuje činnosť reálneho systému
- Efektívny tréningový nástroj
- Pomáha porozumeniu fungovania systému



Nevýhody simulácie

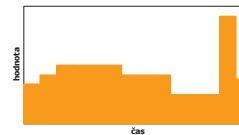
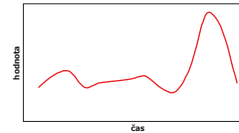


- Nezaručuje získanie optimálnych hodnôt skúmaných parametrov systému (nutnosť iteráčného postupu)
- Stochastičnosť vstupov vyžaduje dôsledné štatistické spracovanie výsledkov
- Vytvorenie modelu vyžaduje odborné znalosti
- Vytvorenie komplexného modelu môže byť časovo náročné



Spojité a diskrétne modely

- **Spojité modely**
Zmeny stavu systému nastávajú priebežne v čase
- **Diskrétné modely**
Zmeny stavu systému nastávajú len v diskrétnych časových okamihoch



Deterministické a stochastické modely

- **Deterministické modely**
 - Všetky vstupy sú pevne dané a nenáhodné.
 - V každom okamihu je možné presne určiť nasledujúci stav systému
- **Stochastické modely**
 - Vstupy sú náhodné premenné



Použité zdroje

- Kavička, A., Klima, V., Adamko, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, EDIS, 2005
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.: *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 2004
- Hušek, R., Lauber, J.: *Simulační modely*, SNTL, 1984
- Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991
- Banks, J.: *Handbook of Simulation*, Wiley, 1998
- Sella, A.F., Cerić, V., Tadić, P.: *Applied Simulation Modeling*, Thomson, 2003
- Klívy, I., Kindler, E.: *Simulace a modelování*, skriptá Ostravské univerzity, 2001
- Kavička, A.: *Sylaby k predmetu Diskrétna simulácia*, DFJP, Univerzita Pardubice
- <http://www.cs.umd.edu/~glam/Mikkel/>
- <http://www.cse.msu.edu/~cse808/notes/>
- <http://www.sce.carleton.ca/courses/94501/s02/>
- <http://crash-test-video.com/magnumfly.net/>
- <http://www.masagroupo.net/>
- <http://www.shmu.sk/>
- <http://www.virtway.com/>
- <http://www.stanford.edu/~boas/science/polymer/>
- <http://www.cae.ohio-state.edu/~kervin/>
- <http://www.aimsim.com/>
- <http://www.ed.ac.uk/schools-departments/vet/news-events/news/archive/2013/equinemodel-020413>
- http://www.inspirationalridingsolutions.com/posts/view/vasa-test-post_1



Statické modelovanie

Prednáška č. 2

Statický model

- Abstrahuje od času
- Čas nemá dôležitú úlohu



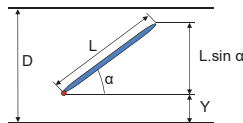
Buffonova ihla

- Pravdepodobnosť, že ihla pretne čiaru je:

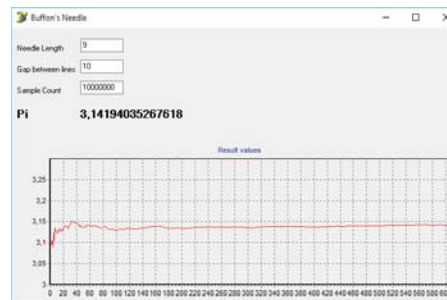
$$p = \frac{2.L}{D.\pi}$$

- Náhodnými pokusmi zistíme hodnotu pravdepodobnosti

$$p = \frac{n_{\text{pretatie}}}{n_{\text{všetky}}} = \frac{m}{n}, \text{ potom } \pi = \frac{2.L}{p.D}$$



Buffonova ihla



Buffonova ihla (pokr.)

- 1864 – Kapitán O.C. Fox

n	m	L [in]	D [in]	Doska	Odhad
500	236	3	4	statická	3,1780
530	253	3	4	rotovaná	3,1423
590	939	5	2	rotovaná	3,1416

- 1901 – Mario Lazzarini

3408 (1808 úspešných) pokusov $\Rightarrow \pi = 3,1415929$

Ihla 2.5 cm, čiary 3 cm (5/6), výsledok 355/113 (Tsu Ch'ung Chi, 500 n.l.)
213=(355)/(5/3), 1808=113*16, 3408=213*16



Buffonova ihla (pokr.)

- N. T. Gridgeman
L = 0,7857, dva pokusy (jeden úspešný)
 $\pi = 3,1428$



Buffonova ihla (pokr.)

- Odhad niečoho, čo sa ťažko vypočíta exaktne, pomocou náhodných pokusov
- Odhad nie je presný – odchýlka, mali by sme vedieť aká je
- Zvýšenie presnosti
 - Viac pokusov
 - Redukcia rozptylu (odchýlky) úpravou experimentu



Využitie náhodných pokusov

- 1777 – G.L. Leclerc de Buffon
Buffonova ihla
- 1908 – William Sealy Gossett (Student)
Potvrdenie t rozdelenia
(Vzorky výšky a dĺžky ukazováka 3000 väzňov)
- Mravce Temnothorax albipennis



Metóda Monte Carlo

- 1946 – Stanislaw Ulam

Myšlienka transformácie nepravdepodobnostných problémov na pravdepodobnostné, ktoré sa dajú riešiť štatistickými metódami s využitím počítačov (náhodné pokusy) (Solitaire, prechod neutrónov štiepnou látkou)

- 1949 – Ulam, von Neumann, Metropolis

Metropolis metódu pomenoval podľa kasín v meste Monte Carlo

Metóda Monte Carlo

- Metóda riešenia problémov, pri ktorých čas nemá dôležitú úlohu, pomocou špeciálne organizovaných štatistických pokusov

- Formulácia novej úlohy (ak je to potrebné), ktorej riešenie je zhodné s riešením pôvodnej úlohy
- Riešenie novej úlohy pomocou štatistických experimentov (s využitím výpočtovej techniky)

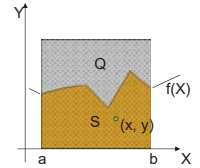
Výpočet integrálu

$$S = \int_a^b f(x) dx$$

$$\frac{S}{Q} = \frac{\text{Pocet pokusov, kde } (x,y) \in S}{\text{Pocet vsetkych pokusov}} =$$

$$= \frac{\int_a^b f(x) dx}{(b-a)^2}, \text{ kde } (x,y) \text{ je náhodný bod } \in Q$$

$$S \approx (b-a)^2 \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}; X_i = 1, \text{ ak } (x_i, y_i) \in S, \text{ inak } X_i = 0$$



Presnosť metódy Monte Carlo

- Odhad chyby s danou úrovňou spoľahlivosti

$$\Delta = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_n^2}{n}} = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p} \cdot (1 - \hat{p})}{n}} \leq \frac{z_{1-\alpha/2}}{2\sqrt{n}}$$

- Napr.: Vykonáme 100 hodení mincou ($N=100$), pri tomto počte pokusov sme sa dopustili chyby približne 10% (s 95% úrovňou spoľahlivosti)

$$\Delta \approx \frac{1.96}{2\sqrt{100}} = \frac{1.96}{20} = 0.098 \approx 0.1$$

Presnosť metódy Monte Carlo

- Konvergencia metódy Monte Carlo je $O(\sqrt{N})$

Ak chceme zvýšiť presnosť N násobne, musíme zvýšiť počet pokusov N^2 násobne.

- Je vhodné využiť niektorú z metód redukcie rozptylu

Metódy redukcie rozptylu

- Metóda protikladných veličín (Antithetic variates)
Využitie negatívne korelovaných náhodných veličín (Buffonov kríž)
- Technika riadiacich veličín (Control variates)
Namiesto odhadu neznámej veličiny odhadujeme rozdiel neznámej veličiny od známej veličiny
- Metóda výberu podľa dôležitosti (Importance sampling)
Sústredenie na miesta s väčším vplyvom
- Metóda stratifikovaných výberov (Stratified sampling)
Rozdelenie výberového priestoru do niekoľkých oblastí – zaručenie rovnomernejšieho náhodného vstupu

Pravdepodobnosť výhry v Lote

- Chceme vedieť, akú máme šancu vyhrať v Lote
 - Analytický výpočet (6 zo 49)
 - Využitie metódy Monte Carlo
- 1. Zvolíme si naše čísla (tiket)
- 2. Vykonáme sériu (tisíce) náhodných pokusov (1 pokus zodpovedá jednému ťahu Lota)
- 3. Sledujeme, koľkokrát sa nám podarilo vyhrať
- 4. ...

Pseudonáhodné čísla

- Požadované vlastnosti náhodných čísiel
 - **nezávislosť**
 - **rovnomerné rozdelené**, zvyčajne na intervale $[0,1)$
- „Náhodné čísla“ generujeme na počítači
- Produktom aritmetických generátorov nie sú náhodné čísla (sú vypočítané), preto ich označujeme ako **pseudonáhodné čísla** (čísla, ktoré sa zdajú byť náhodnými)

Lineárny kongruenčný generátor

- *Linear congruential generator (LCG)*
- *Lehmer, 1951*

$$X_i = (aX_{i-1} + c) \bmod m$$

$$U_i = X_i/m$$

- Začíname z hodnoty X_0 – násada (*seed*)
- $0 < m, a < m, c < m, X_0 < m$
- $LCG(a, c, m), X_0$

Príklad LCG(3, 5, 8)

$$X_0=6, X_i = (3X_{i-1} + 5) \bmod 8, U_i = X_i/8$$

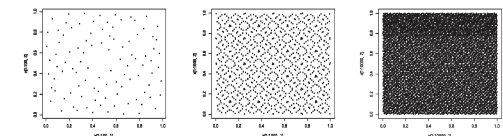
i	X_i	U_i
0	6	–
1	7	0,875
2	2	0,250
3	3	0,375
4	6	0,750
5	7	0,875
6	2	0,250

Quasi Monte Carlo

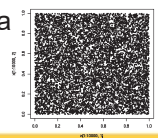
- Namiesto (pseudo)náhodných čísiel sa využívajú **kvázináhodné postupnosti** čísiel.
 - Také, ktoré rovnomerne vyplňajú daný priestor
 - Medzi jednotlivými číslami môže existovať zjavná závislosť
 - Napr.: Interval 1 – 100
 - Pseudonáhodné čísla: 4, 55, 87, 1, 12, 33, 97
 - Kvázináhodné čísla: 1, 50, 25, 75, 12, 62, 37, 88
- Lepšie štatistické vlastnosti pri istých typoch úloh (napr. výpočet integrálov)

Quasi Monte Carlo

- Kvázináhodná sekvencia



- (Pseudo)náhodná sekvencia



Využitie metódy Monte Carlo

- Jadrová fyzika (rozptyl častíc)
- Bezpečnosť (ochrana pred radiáciou)
- Chémia (výskum molekúl)
- Matematika (integrály, experimentálne riešenie rovníc)



Využitie metódy Monte Carlo (pokr.)

- Medicína (plánovanie rádioterapie – 3D MC)
- Ekonomika (RISK analýza, opt. stavy zásob)
- Informatika (Rendering)



Použité zdroje

- Kavička, A., Klima, V., Adamko, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, EDIS, 2005
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.: *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 2004
- Hušek, R., Lauber, J.: *Simulační modely*, SNTL, 1984
- Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991
- Banks, J.: *Handbook of Simulation*, Wiley, 1998
- Sella, A.F., Ceric, V., Tadikamalla, P.: *Applied Simulation Modeling*, Thomson, 2003
- Křivý, I., Kindler, E.: *Simulace a modelování*, skriptá Ostravské univerzity, 2001
- Kavička, A.: *Sylaby k predmetu Diskrétní simulace*, DFJP, Univerzita Pardubice
- <http://www.cs.umd.edu/~glam/Mikkeli/>
- <http://www.cse.msu.edu/~cae808/hotel/>
- <http://www.sce.carleton.ca/courses/94501/s02/>
- <http://www.wikipedia.com/>
- <http://www.ulamspiral.com>
- <http://www.antweb.org/description.do?genus=temnothorax&name=albipennis&project=belgiumants&rank=species>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Enrico_Fermi

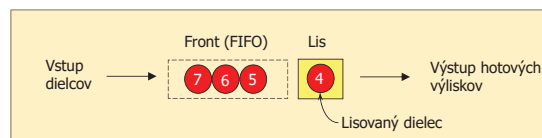


Dynamická simulácia

Prednášky č. 3 a 4

Modelovanie a simulácia
doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

Obslužný systém - Lis



Úloha:

- Odhad očakávanej produkcie
- Čas čakania dielca vo fronte
- Dĺžka frontu čakajúcich dielcov
- Vyťaženie lisu



Požadované vlastnosti modelu

- Začína prázdny v čase 0
- Vstupy (predpokladajme, že sú dané), v minútach:

Číslo dielca	Čas vstupu	Čas medzi vstupmi	Doba obsluhy
1	0.00	1.73	2.90
2	1.73	1.35	1.76
3	3.08	0.71	3.39
4	3.79	0.62	4.52
5	4.41	14.28	4.46
6	18.69	0.70	4.36
7	19.39	15.52	2.07
8	34.91	3.15	3.36
9	38.06	1.76	2.37
10	39.82	1.00	5.38
11	40.82	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

- Koniec po 20 minútach simulačného času



Ciele – parametre výkonu systému

- **Celková produkcia** výliskov za beh (P)
- **Priemerný čas čakania** dielcov vo fronte

$$\frac{\sum_{i=1}^N WQ_i}{N}$$

N = počet dielcov, ktoré ukončili čakanie
 WQ_i = čakanie i -teho dielca
 Vieme: $WQ_1 = 0$ (prečo?)
 $N > 1$ (prečo?)

- **Maximálny čas čakania** dielcov vo fronte

$$\max_{i=1..N} WQ_i$$



Ciele – parametre výkonu systému (pokr.)

- **Priemerný počet** dielcov vo fronte

$$\frac{\int_0^{20} Q(t) dt}{20} \quad Q(t) = \text{počet dielcov vo fronte v čase } t$$

- **Maximálny počet** dielcov vo fronte

- **Priemerný a maximálny čas** dielcov v systéme

$$\frac{\sum_{i=1}^P TS_i}{P}, \quad \max_{i=1..P} TS_i \quad T_i = \text{čas } i\text{-teho dielca v systéme}$$



Ciele – parametre výkonu systému (pokr.)

- **Využitie lisu**

$$\frac{\int_0^{20} B(t) dt}{20}, \quad B(t) = \begin{cases} 1 & \text{ak lis v čase } t \text{ pracuje} \\ 0 & \text{ak lis v čase } t \text{ nepracuje} \end{cases}$$

- Iné vyhodnotenia
(Pozor na zahlienie informáciami)



Možnosti analýzy

1. Podložený odhad

- Priemerný čas medzi vstupmi dielcov = 4.08 min
- Priemerný čas obsluhy = 3.46 min



(Priečne) sú dielce lisované rýchlejšie ako do systému vstupujú

- System má šancu fungovať stabilne počas dlhšej doby
- Ak by boli časy medzi vstupmi a časy obsluhy rovné priemerným hodnotám => nikdy by nevznikol front
- Časy ale majú rôzne hodnoty => front môže vzniknúť



Možnosti analýzy (pokr.)

1. Podložený odhad

- Ak priemerný čas medzi vstupmi < priemerný čas obsluhy



Zahlienie systému

- Skutočnosť je niekde medzi týmito extrémami, ale nevieme odhadnúť kde
- Odhad má limitované možnosti



Možnosti analýzy (pokr.)

2. Teória hromadnej obsluhy

- Vyžaduje dodatočné predpoklady o modeli
- Napríklad **M/M/1**
 - Čas medzi vstupmi ~ exponenciálne rozdelenie
 - Čas obsluhy ~ exponenciálne rozdelenie (nezávislé)
 - Musí platiť $E(\text{obsluha}) < E(\text{medzi príchodmi})$
 - Exaktné analytické výsledky; napr. priemerný čas čakania vo fronte je

$$\frac{\mu_s^2}{\mu_A - \mu_s}, \quad \mu_A = E(\text{cas medzi príchodmi})$$

$$\mu_s = E(\text{doba obluhy})$$



Možnosti analýzy (pokr.)

2. Teória hromadnej obsluhy

- Problémy:
 - validita (je to naozaj exponenciálne?)
 - odhady stredných hodnôt (nepresnosť)
 - nezohľadňuje obmedzený čas (20 min)
- Vhodná iba ako prvotný odhad

3. Simulácia



Simulačný model

▪ Systém

- Entity
 - Obsluhované
 - Zdroje obsluhy
- Atribúty

▪ Dynamický systém

Ako modelovať dynamické vlastnosti systému?



Aktivita

Aktivita je základná akčná jednotka simulácie, ktorá je obrazom istej činnosti v simulovanom systéme

- má isté časové trvanie
- potenciálne mení stav systému



Spojité aktivita

- môže meniť stav systému počas celej doby jej trvania
- časová existencia aktivity je charakterizovaná intervalom reálnych čísel $\langle t_1, t_2 \rangle$



- Pri začatí zvyčajne nevieme určiť čas ukončenia



Diskrétna aktivita

- môže zmeniť stav systému iba v okamihu skončenia aktivity (v priebehu trvania aktivity stav systému zmeniť nemôže)
- časová existencia je charakterizovaná jednoprvkovou množinou reálnych čísel $\{t_2\}$



- Pri začatí aktivity zvyčajne vieme určiť jej koniec

Udalosť – ukončenie diskkrétnej aktivity a tým vyvolaná zmena stavu systému



Typy simulácie

- **Spojité simulácia**
Simulujúci systém obsahuje iba spojité aktivity
- **Diskrétna simulácia**
Simulujúci systém obsahuje iba diskkrétne aktivity
- **Kombinovaná (diskrétno-spojité) simulácia**
Simulujúci systém obsahuje spojité aj diskkrétne aktivity



Vykonávanie simulácie

- Vykonávanie jednotlivých aktivít, tak ako prebiehajú v čase
- Diskrétna aktivita môže meniť stav systému len na svojom konci (pri výskyte udalosti)



simulujeme výskyt udalostí
Udalostne orientovaná simulácia



Atribúty udalosti

- čas výskytu
- akcia spojená s výskytom udalosti
 - zmena stavu systému
 - naplánovanie ďalších udalostí



Simulačný čas

- čas v simulačnom pokuse
- zodpovedá reálnemu času
- väčšinou ubieha rýchlejšie ako reálny čas
- trvanie simulačných aktivít musí byť proporcionálne trvaniu skutočných činností
- nikdy nemôže klesať (dodržanie kauzality)

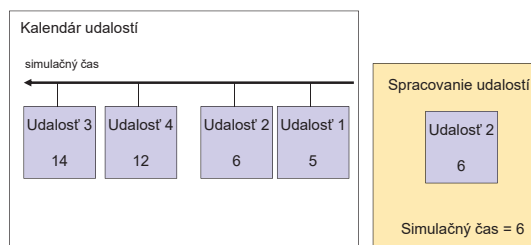


Metóda plánovania udalostí

- Výskyt udalosti plánujeme dopredu
- Udalosti sú udržiavané v kalendári udalostí (časová os)
- Kalendár udalostí je usporiadaný podľa času výskytu udalostí
- Simulácia spočíva v postupnom spracovávaní naplánovaných udalostí



Metóda plánovania udalostí (pokr.)



Metóda plánovania udalostí (pokr.)

KROK	Činnosť	Výkonaná za podmienok
0	Inicializácia simulačného času ($t_s (t_s = 0)$)	
1	Ukončenie behu simulačného programu	Kalendár neobsahuje žiadne udalosti alebo je vyčerpaný čas vymedzený pre beh simulačného programu
2	Odobratie udalosti z „vrcholu“ kalendára (s najmenšou hodnotou t_d / t_p / plánovaného času výskytu)	
3	Aktualizácia simulačného času ($t_s = t_d$)	
4	Výkon akcie spojenej s výskytom udalosti (akcia vykonáva stavové zmeny a prípadné plánovanie ďalších udalostí)	
5	Návrat na KROK 1	



Udalosť „Vstup dielca“

- „Príchod nového zákazníka“
- Ak je lis voľný
 - obsaď lis
 - naplánuj ukončenie lisovania (udalosť Výstup dielca)
- Ak je lis obsadený
 - zaraď dielec do frontu
- Zmena sledovaných hodnôt
- Naplánovanie vstupu ďalšieho dielca



Udalosť „Koniec obsluhy – Výstup dielca“

- Koniec obsluhy (lisovania) dielca
- Ak front nie je prázdny
 - vyber prvý dielec z frontu
 - naplánuj ukončenie lisovania vybraného dielca (udalosť Výstup dielca)
- Ak je front prázdny
 - uvoľni lis
- Zmena sledovaných hodnôt



Udalosť „Koniec“

- Koniec simulácie
- Aktualizácia sledovaných hodnôt
- Vyhodnotenie výsledkov



Ručná simulácia: Setup

Systém	Sim. čas	$\bar{Q}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte	Kalendár udalostí
Počet ukončených čakanií vo fronte	Suma časov čakania vo fronte	Plocha pod $Q(t)$	Plocha pod $\bar{Q}(t)$		
$Q(t)$ graf					
$\bar{Q}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.73, 1.35, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.90, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 0.00$, Inicializácia

Systém	Sim. čas	$\bar{Q}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte <prázdny>	Kalendár udalostí [1, 0.00, Vstup] [-, 20.00, Koniec]
Počet ukončených čakanií vo fronte	Suma časov čakania vo fronte	Plocha pod $Q(t)$	Plocha pod $\bar{Q}(t)$		
$Q(t)$ graf					
$\bar{Q}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.73, 1.35, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.90, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 0.00$, Vstup Dielca 1

Systém	Sim. čas	$\bar{Q}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte <prázdny>	Kalendár udalostí [2, 1.73, Vstup] [1, 2.90, Výstup] [-, 20.00, Koniec]
Počet ukončených čakanií vo fronte	Suma časov čakania vo fronte	Plocha pod $Q(t)$	Plocha pod $\bar{Q}(t)$		
$Q(t)$ graf					
$\bar{Q}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.73, 1.35, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.90, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				

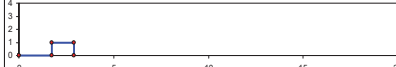
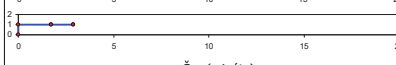


$t = 1.73$, Vstup Dielca 2

Systém	Sim. čas	$E(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte	Kalendár udalostí
<div><div>2</div><div>1</div></div>	1.73	1	1	(1.73)	[1, 2.90, Výstup] [3, 3.08, Výstup] [-, 20.00, Koniec]
Počet ukončených čakani vo fronte 1	Suma časov čakania vo fronte	Plocha pod $Q(t)$		Plocha pod $E(t)$	
	0.00	0.00		1.73	
<div><div>$Q(t)$ graf</div><div>$E(t)$ graf</div></div>					
<div>Časy medzi vstup.</div> <div>2.90, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...</div> <div>Doby obsluhy</div> <div>2.90, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...</div>					



$t = 2.90$, Výstup Dielca 1

Systém	<div><div>2</div></div>	Sim. čas	$E(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte <prázdny>	Kalendár udalostí
		2.90	1	0		Vstup: [3, 3.08, [2, 4.66, [-, 20.00, Výstup Koniec
Počet ukončených čakani vo fronte 2	Suma časov čakania vo fronte 1.17	Plocha pod $Q(t)$ 1.17			Plocha pod $E(t)$ 2.90	
<div><div>$Q(t)$ graf</div><div></div><div>$E(t)$ graf</div><div></div></div>						
Časy medzi vstup.	1.73, 1.35, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...					
Doby obsluhy	2.90, 2.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...					



$t = 3.08$, Vstup Dielca 3

Systém	Sim. čas	$E(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte	Kalendár udalostí
<div><div>3</div><div>2</div></div>	3.08	1	1	(3.08)	[4, 3.79, Vstup] [2, 4.66, Výstup] [-, 20.00, Koniec]
Počet ukončených čakani vo fronte	Suma časov čakania vo fronte	Plocha pod $Q(t)$		Plocha pod $E(t)$	
2	1.17	1.17		3.08	
$Q(t)$ graf					
$E(t)$ graf					
	Čas (minúty)				
Časy medzi vstup.	1.3, 1.85, 0.1, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.80, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 3.79$, Vstup Dielca 4

Systém	Sim. čas	$E(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte (3.79, 3.08)	Kalendár udalostí
<div><div>4</div><div>3</div><div>2</div></div>	3.79	1	2		[5, 4.41, Výstup] [2, 4.66, Výstup] [-, 20.00, Koniec]
Počet ukončených čakani vo fronte 2	Suma časov čakania vo fronte 1.17	Plocha pod $Q(t)$ 1.88		Plocha pod $E(t)$ 3.79	
$Q(t)$ graf					
$E(t)$ graf					
Časy medzi vstup.					
Doby obsluhy					
Čas (minúty)					
1.35, 1.35, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...					
2.90, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...					



$t = 4.41$, Vstup Dielca 5

Systém	Sim. čas	$E(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte	Kalendár udalostí
<div>5432</div>	4.41	1	3	(4.41, 3.79, 3.08)	[2, 4.66, Výstup] [6, 18.69, Výstup] [-, 20.00, Koniec]
Počet ukončených čakani vo fronte 2	Suma časov čakania vo fronte 1.17	Plocha pod $Q(t)$ 3.12		Plocha pod $E(t)$ 4.41	
<div><div>$Q(t)$ graf</div><div></div></div> <div><div>$E(t)$ graf</div><div></div></div>					
Časy medzi vstup. 1.35, 1.25, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...					
Doby obsluhy 2.90, 1.76, 3.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...					



$t = 4.66$, Výstup Dielca 2

Systém	Sim. čas	$E(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte	Kalendár udalostí
<div><div>5</div><div>4</div><div>3</div></div>	4.66	1	2	(4.41, 3.79)	[3, 8.05, Výstup] [6, 18.69, Výstup] [-, 20.00, Koniec]
Počet ukončených čakani vo fronte 3	Suma časov čakania vo fronte 2.75	Plocha pod $Q(t)$ 3.87		Plocha pod $E(t)$ 4.66	
<div><div>$Q(t)$ graf</div><div></div></div> <div><div>$E(t)$ graf</div><div></div></div> <div>Čas (minúty)</div>					
Časy medzi vstup. 1.35, 1.35, 1.71, 1.62, 1.428, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...					
Doby obsluhy 2.80, 2.76, 2.39, 4.52, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...					



$t = 8.05$, Výstup Dielca 3

Systém	Sim. čas	$\bar{X}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte (4.41)	Kalendár udalostí [4, 12.57, Výstup]
	8.05	1	1		[6, 18.69, Vstup]
Počet ukončených čakani vo fronte 4	Suma časov čakania vo fronte 7.01		Plocha pod $Q(t)$ 10.65	Plocha pod $\bar{X}(t)$ 8.05	
$Q(t)$ graf					
$\bar{X}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.23, 1.25, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.80, 1.76, 3.29, 4.82, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 12.57$, Výstup Dielca 4

Systém	Sim. čas	$\bar{X}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte <prázdny>	Kalendár udalostí [5, 17.03, Výstup]
	12.57	1	0		[6, 18.69, Vstup]
Počet ukončených čakani vo fronte 5	Suma časov čakania vo fronte 15.17		Plocha pod $Q(t)$ 15.17	Plocha pod $\bar{X}(t)$ 12.57	
$Q(t)$ graf					
$\bar{X}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.23, 1.25, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.80, 1.76, 3.29, 4.82, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 17.03$, Výstup Dielca 5

Systém	Sim. čas	$\bar{X}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte <prázdny>	Kalendár udalostí [6, 18.69, Vstup]
	17.03	0	0		[6, 18.69, Vstup]
Počet ukončených čakani vo fronte 5	Suma časov čakania vo fronte 15.17		Plocha pod $Q(t)$ 15.17	Plocha pod $\bar{X}(t)$ 17.03	
$Q(t)$ graf					
$\bar{X}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.23, 1.25, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.80, 1.76, 3.29, 4.82, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 18.69$, Príchod Dielca 6

Systém	Sim. čas	$\bar{X}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte <prázdny>	Kalendár udalostí [7, 19.39, Vstup]
	18.69	1	0		[6, 18.69, Vstup]
Počet ukončených čakani vo fronte 6	Suma časov čakania vo fronte 15.17		Plocha pod $Q(t)$ 15.17	Plocha pod $\bar{X}(t)$ 17.03	
$Q(t)$ graf					
$\bar{X}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.23, 1.25, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.80, 1.76, 3.29, 4.82, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 19.39$, Príchod Dielca 7

Systém	Sim. čas	$\bar{X}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte (19.39)	Kalendár udalostí [7, 19.39, Vstup]
	19.39	1	1		[6, 18.69, Vstup]
Počet ukončených čakani vo fronte 6	Suma časov čakania vo fronte 15.17		Plocha pod $Q(t)$ 15.17	Plocha pod $\bar{X}(t)$ 17.73	
$Q(t)$ graf					
$\bar{X}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.23, 1.25, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.80, 1.76, 3.29, 4.82, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				



$t = 20.00$, Koniec

Systém	Sim. čas	$\bar{X}(t)$	$Q(t)$	Časy príchodu dielcov vo fronte (19.39)	Kalendár udalostí [8, 23.05, Vstup]
	20.00	1	1		[6, 18.69, Vstup]
Počet ukončených čakani vo fronte 6	Suma časov čakania vo fronte 15.17		Plocha pod $Q(t)$ 15.78	Plocha pod $\bar{X}(t)$ 18.34	
$Q(t)$ graf					
$\bar{X}(t)$ graf					
Časy medzi vstup.	1.23, 1.25, 0.71, 0.62, 14.28, 0.70, 15.52, 3.15, 1.76, 1.00, ...				
Doby obsluhy	2.80, 1.76, 3.29, 4.82, 4.46, 4.36, 2.07, 3.36, 2.37, 5.38, ...				

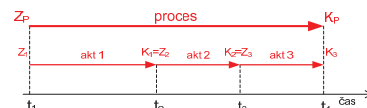


Procesovo orientované modelovanie

- Oproti udalostnému pohľadu je prirodzenejšie a prehľadnejšie (najmä pri komplexných modeloch)
- Sleduje cestu obsluhovanej entity systémom
- Sústreďuje sa na procesy, ktorými entita prechádza

Proces

Proces je postupnosť prirodzene na seba nadväzujúcich aktivít, ktoré spolu tvoria istý logický celok



- Po štarte procesu P sa najprv vykoná aktivita a_1 , po jej ukončení aktivita a_2 a nakoniec aktivita a_3 , ktorej ukončenie sa chápe zároveň ako koniec procesu P

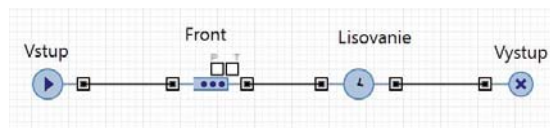
Lisovňa (procesovo orientovane)

- Cesta entity systémom
 - Vytvor sa
 - Zarad' sa na koniec frontu
 - Čakaj pokým sa neuvoľní lis
 - Obsaď lis (a vyrad' sa z frontu)
 - Zdrž sa na čas odpovedajúci lisovaniu
 - Uvoľni lis
 - Aktualizuj potrebné štatistiky (pribežne)
 - Odíď zo systému a uvoľni sa

AnyLogic

- Grafický návrh modelu
- Podporuje rôzne paradigmy modelovania
 - Procesovo orientované (Discrete Event)
 - Agentovo orientované (Agent Based)
 - Systémová dynamika (System Dynamics)
- Založený na jazyku JAVA
- Podpora 2D a 3D grafických výstupov
- Podpora spracovania výsledkov

Lis v AnyLogicu



Použité zdroje

- Kavička, A., Klima, V., Adamko, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, EDIS, 2005
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.: *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 2004
- Hušek, R., Lauber, J.: *Simulační modely*, SNTL, 1984
- Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991
- Banks, J.: *Handbook of Simulation*, Wiley, 1998
- Sella, A.F., Ceric, V., Tadikamalla, P.: *Applied Simulation Modeling*, Thomson, 2003
- Kavička, A.: *Sylaby k predmetu Diskrétná simulace*, DFJP, Univerzita Pardubice
- www.anylogic.com



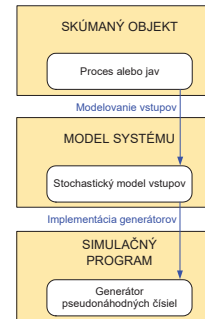
Modelovanie vstupných dát

Prednáška č. 5

Modelovanie a simulácia
doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

Model vstupných dát

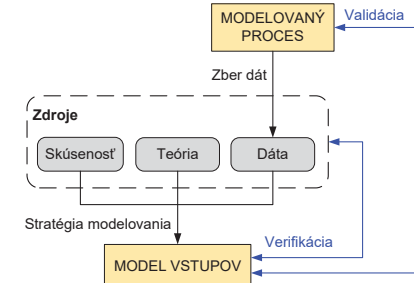
- Modelujeme dáta v modelovanom systéme, ktoré vstupujú do simulačného modelu
- Od kvality modelovania konkrétnych vstupných dát závisia výsledky modelu



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

2

Model vstupných dát



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

3

Vstupné dáta

- Spôsoby modelovania vstupnej veličiny:
 - Deterministicky
 - Niektoré veličiny sú deterministické (počet operátorov)
 - Pozor na modelovanie stochastických veličín deterministicky (príchod zákazníkov k stánku PNS)
 - Stochasticky
 - Stochastické veličiny sú veľmi časté (čas obsluhy, príchod zákazníkov, časy medzi poruchami, ...)
 - Náhodná premenná (využitie rozdelenia pravdepodobnosti)



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

4

Tvorba modelu vstupných dát

1. Získanie dát z modelovaného systému
2. Výber vhodného spôsobu modelovania dát
3. Vytvorenie modelu dát
4. Overenie vytvoreného modelu dát



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

5

Zber dát

- Najnáročnejšia časť modelovania vstupných dát
- Ako získať dáta:
 - Zber dát priamo za účelom tvorby simulačného modelu (výhodnejšie)
 - Využitie existujúcich (už zozbieraných) dát (lacnejšie)



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

6

Priamy zber dát

- Plánovanie
- Zozbierajte 100-200 pozorovaní (vzoriek)
- Zachovajte dostatočnú presnosť
- Zozbierajte vzorky z rôznych častí dňa, týždňa, ... (ak je predpoklad ich variability)
- Testujte nezávislosť vzoriek dát (korelácia)
- Spájajte homogénne vzorky dát (vhodné je otestovať – Kruskalov-Wallisov test)



Využitie existujúcich dát

- Dáta nemusia byť usporiadané podľa poradia zberu (dôležité pre testy autokorelácie)
- Dáta môžu byť združené do skupín
- Dáta nemusia mať požadovanú presnosť
- Môžu byť obsiahnuté chybné dáta
- Dáta môžu obsahovať viac združených veličín (doba opravy stroja závisí od druhu práce – oprava, údržba)
- Dáta nemusia byť reprezentatívne pre aktuálnu situáciu



Použitie dát

- * Priame využitie dát v simulácii
- ** Empirické rozdelenie pravdepodobnosti
- *** Štatistické (teoretické) rozdelenie pravdepodobnosti



Priame využitie dát

- Trace-driven simulation
 - Dáta reprezentujú minulosť systému, môžu byť odhadom jeho budúcnosti (pri zachovaní rovnakých podmienok)
- ☹ Vyskytujú sa len namerané hodnoty
- ☹ Nedostatok dát na dlhšie (väčší počet) behy
- ☹ Môže byť pomalé (čítanie dát zo súboru)
- ☺ Vhodné pre validáciu modelu



Empirické rozdelenie prsti

- Diskrétné (len namerané hodnoty)
 - Spojité (aproximácia)
- ☺ Vhodné ak nie je možné nájsť teoretické rozdelenie pravdepodobnosti
- ☹ Sú ohraničené (len nameraný rozsah hodnôt) (možnosť pripojenia „chvostov“)
- ☹ Kvalita je úplne závislá od kvality vzoriek
- ☹ Nepresné pri malom množstve dát („zubatosť“, extrémne hodnoty)



Teoretické rozdelenie prsti

- Diskrétné
 - Spojité
- ☺ Vyhľadanie nameraných vzoriek
- ☺ Poskytne aj hodnoty mimo nameraného rozsahu
- ☺ Možnosť jednoducho meniť parametre (stredná doba medzi príchodmi)
- ☺ Kompaktnejšie ako empirické rozdelenie (nepotrebujeme evidovať tabuľky, ...)
- ☹ Nie vždy sa dá nájsť vhodné rozdelenie



Teoretické rozdelenie prsti

1. Test nezávislosti dát
2. Výber vhodného rozdelenia (prípadne skupiny rozdelení) pravdepodobnosti
3. Zistenie parametrov vybraného rozdelenia
4. Testovanie zvoleného rozdelenia a jeho parametrov štatistickými testmi dobrej zhody (χ^2 test, Kolmogorovov-Smirnov test)



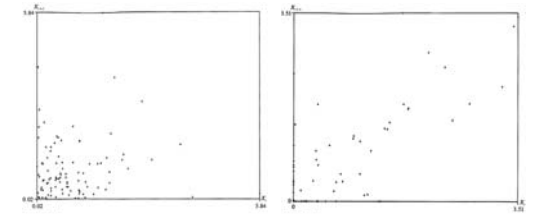
Test nezávislosti

- Mnohé štatistické metódy (napr. χ^2 test) predpokladajú, že dáta sú nezávislé a rovnako rozdelené (pochádzajúce z rovnakého rozdelenia) vzorky z daného rozdelenia (IID=Independent & Identically Distributed)
- Je potrebné testovať



Test nezávislosti

- Scatter plot



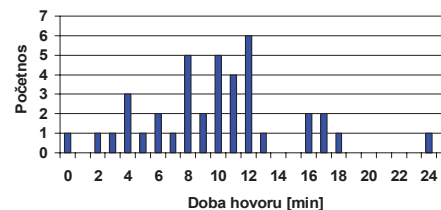
Výber vhodného rozdelenia

- Vyberáme na základe:
 - Teoretických znalostí (napr.: príchod zákazníkov ~ Poissonov proces)
 - Číselných charakteristík (napr.: koeficient rozptylu, šikmosť, špicatosť, ...)
 - Rozsahu hodnôt (ohraničenie) (napr.: doba lisovania nadobúda kladné hodnoty)
 - Eyeballing („Od oka“) (na základe histogramu)



Histogram

- X-ová os – triedy hodnôt veličiny
- Y-ová os – početnosť výskytov hodnôt v danej triede



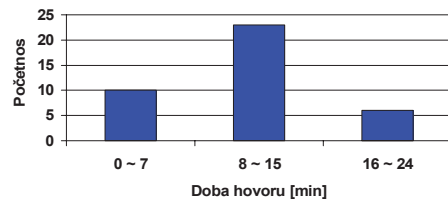
Histogram

- Problém je určiť počet a hranice tried hodnôt
- Heuristika: počet tried by sa mal približne rovnať druhej odmocnine počtu vzoriek
- Zle zvolené triedy môžu mať za následok nevhodne zvolené rozdelenie pravdepodobnosti



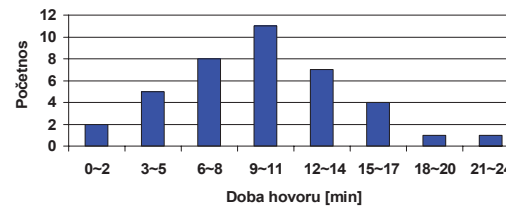
Histogram

- „Hrubý“ histogram



Histogram

- Primeraný histogram



Diskrétné rozdelenia prsti

- Alternatívne (Bernoulliho)
- Binomické
- Geometrické
- Poissonovo

Alternatívne (Bernoulliho) RP

- ✳ Náhodné javy, ktoré majú dva rôzne výsledky

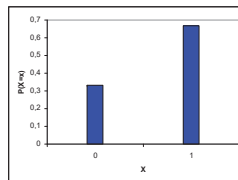
- Úspech/Neúspech

p (pravdepodobnosť úspechu)

$\Leftrightarrow \{0, 1\}$

$$P(X = x) = \begin{cases} p, & x = 1 \\ 1 - p, & x = 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = p \quad \text{Var}(X) = p(1 - p)$$



Binomické RP

- ✳ Počet úspešných pokusov v n pokusoch

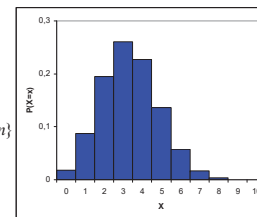
- Počet chybných kusov v krabici, kde je n kusov

p (prst), n (počet pokusov)

$\Leftrightarrow \{0, 1, \dots, n\}$

$$P(X = x) = \begin{cases} \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x}, & x \in \{0, 1, \dots, n\} \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = np \quad \text{Var}(X) = np(1 - p)$$



Geometrické RP

- ✳ Počet neúspechov pred prvým úspechom

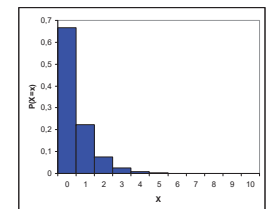
- Počet kontrolovaných výrobkov pred zistením chybného kusu

p (prst)

$\Leftrightarrow \{0, 1, \dots\}$

$$P(X = x) = \begin{cases} p(1 - p)^x, & x > 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = \frac{(1 - p)}{p} \quad \text{Var}(X) = \frac{(1 - p)}{p^2}$$



Poissonovo RP

✳ Početnosť nastatia javu za fixný časový interval

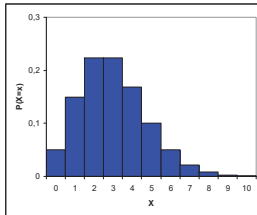
- Počet zákazníkov za hodinu, počet ks požadovaných zo skladu

λ (intenzita)

$\Leftrightarrow \{0, 1, \dots\}$

$$P(X = x) = \begin{cases} \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}, & x > 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = \lambda \quad \text{Var}(X) = \lambda$$



Spojité rozdelenia pravdepodobnosti

- Rovnomerné
- Exponenciálne
- Erlangovo
- Gama
- Weibullovo
- Normálne
- Log-normálne
- Trojuholníkové
- Beta



Exponenciálne RP

✳ Časy medzi javmi

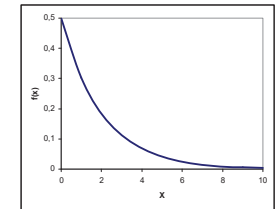
- Časy medzi príchodmi zákazníkov, časy medzi poruchami

β (str. hodnota)

$\Leftrightarrow [0, \infty)$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta} e^{-x/\beta}, & x > 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = \beta \quad \text{Var}(X) = \beta^2$$



Erlangovo RP

✳ Suma k nezávislých exponenciálnych NP

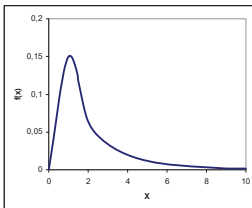
- Čas potrebný na dokončenie aktivity (aktivity, ktoré sa skladajú z viacerých fáz a kde každá fáza má exponenciálne rozdelenie)

β, k (počet)

$\Leftrightarrow [0, \infty)$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{k-1} e^{-x/\beta}}{\beta^k (k-1)!}, & x > 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = k\beta \quad \text{Var}(X) = k\beta^2$$



Gamma RP

✳ Zovšeobecnenie Erlangovho RP

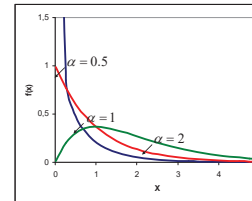
- Čas trvania aktivity (obsluha zákazníka, lisovanie)

α (tvar), β (rozmer)

$\Leftrightarrow [0, \infty)$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}, & x > 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = \alpha\beta \quad \text{Var}(X) = \alpha\beta^2$$



Weibullovo RP

✳ Používa sa na modelovanie spoľahlivosti

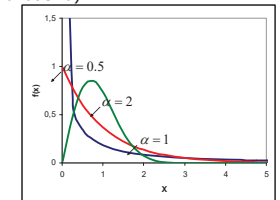
- Čas medzi poruchami zariadenia, ktoré je zložené z veľkého počtu dielov (ktoré sa kazia nezávisle a výpadok jedného má za následok výpadok celého zariadenia)

α (tvar), β (rozmer)

$\Leftrightarrow [0, \infty)$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta^{\alpha}} x^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)^{\alpha}}, & x > 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad \text{Var}(X) = \frac{\beta^2}{\alpha^2} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\}$$



Normálne RP

✧ Veličiny, ktoré sú súčtom veľkého počtu veličín (CLV)

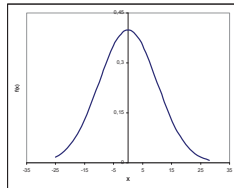
- Chyby rôzneho druhu (váženie výrobkov)
- Pozor na rozsah!

✎ μ (str.h.), σ

⇔ $(-\infty, \infty)$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}$$

$$E[X] = \mu \quad \text{Var}(X) = \sigma^2$$



Logaritmicko-Normálne RP

✧ Veličiny, ktoré sú súčtom veľkého počtu veličín (CLV)

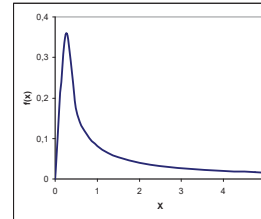
- Čas trvania aktivity (má dlhý chvost vpravo)

✎ μ (rozmer), σ (tvar)

⇔ $[0, \infty)$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-(\ln(x)-\mu)^2 / 2\sigma^2}, & x > 0 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad \text{Var}(X) = e^{2\mu + \sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1)$$



Trojuholníkové RP

✧ Používa sa v prípade nedostatku dát

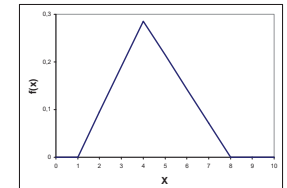
- Máme iba odhad min, max a najpravdepodobnejšej hodnoty

✎ a (min), b (max), m (modus)

⇔ $[a, b]$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-a)}, & a \leq x < m \\ \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)}, & m \leq x < b \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = (a+b+m)/3 \\ \text{Var}(X) = (a^2 + m^2 + b^2 - ma - ab - mb)/18$$



Beta RP

✧ Používa sa v prípade nedostatku dát

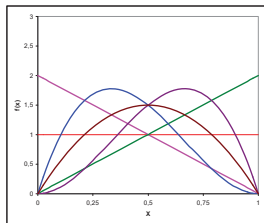
- Veľmi flexibilný tvar

✎ α, β (tvar)

⇔ $[0, 1]$; dá sa transf. na $[a, b]$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{inak} \end{cases}$$

$$E[X] = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \quad \text{Var}(X) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}$$



Zistenie parametrov rozdelenia

- Štatistické metódy odhadov parametrov
 - Odhady strednej hodnoty a rozptylu vzorky
 - Metóda momentov
 - Metóda maximálnej vierohodnosti
(Maximum-likelihood estimator MLE)



Testy dobrej zhody

- Test hypotézy, či vybrané rozdelenie dobre modeluje vzorku dát
- Dva najpoužívannejšie testy:
 - χ^2 test (Carl Pearson)
 - Kolmogorov-Smirnov test
- Veľkosť vzorky dát je dôležitá
 - Málo dát – testy neodmietnu skoro žiadnu hypotézu
 - Veľa dát – testy odmietnu skoro všetky hypotézy



χ^2 test

- Testujeme hypotézu, že dve vzorky dát pochádzajú z rovnakého rozdelenia
- Testovacia štatistika:

$$\chi^2_{k-1} = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Hodnoty rozdělíme do intervalov.
 k – počet intervalov
 O_i – pozorovaná početnosť v intervale i
 E_i – očakávaná početnosť v intervale i

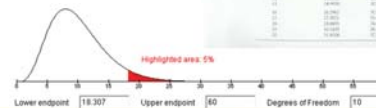
- Hodnotu test. štatistiky porovnávame s kritickou hodnotou χ^2 rozdelenia na danej hladine významnosti



Kritické hodnoty

- Tabuľkové hodnoty p
- Dva parametre:
 - Počet stupňov voľnosti (k-1)
 - Hladina významnosti (zvyčajne 5%)

- Hypotézu zamietame ak:
 $\chi^2 > p$



APPENDIX 5
 CRITICAL VALUES FOR THE CHI-SQUARE TEST

Significance Level	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.10	1.64	1.39	1.36	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18	1.16	1.15	1.13	1.12	1.10	1.09	1.07
0.05	1.64	1.39	1.36	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18	1.16	1.15	1.13	1.12	1.10	1.09	1.07
0.01	1.64	1.39	1.36	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18	1.16	1.15	1.13	1.12	1.10	1.09	1.07



Testy dobrej zhody

- χ^2 test
 - Potrebuje väčšie množstvo dát
 - Ak má dostatok dát, je presnejší
 - Vyžaduje rozdelenie do intervalov - problém
- Kolmogorovov-Smirnovov test
 - Stačí mu menšie množstvo dát
 - Pri väčšom počte dát, je menej presný



Input Analyzer

- Program na analýzu vstupných dát
- Súčasť balíka Rockwell Arena
- Umožňuje nájsť najvhodnejšie rozdelenie pravdepodobnosti pre reprezentáciu danej vzorky dát
- Používa minimálnu kvadratickú odchýlku, χ^2 test, Kolmogorovov-Smirnovov test
- Poskytne parametre rozdelenia



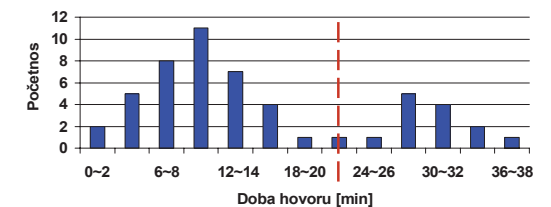
Nedostatok dát

- Ak dáta nie sú k dispozícii
 - Využitie existujúceho modelu podobného procesu
 - Typ procesu (Príchod ~ Poisson, ...)
 - Názory expertov (min, max ~ Rovnomerné, + najpravdepodobnejšia hodnota (modus) ~ Trojuholníkové, + stredná hodnota ~ Beta)
- Analýza citlivosti



Multimodálne procesy

- Telefonické hovory (rôzne povahy volajúcich)



Nestacionárne procesy

- Napr.: počet zákazníkov prichádzajúcich do reštaurácie (za hodinu) sa mení počas dňa (obed)
- Nesmieme zanedbať
- Rozdeliť na intervaly, v ktorých sa dá intenzita príchodu považovať za konštantnú
- Určiť intenzitu pre každý interval



Použité zdroje

- Kavička, A., Klima, V., Adamko, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, EDIS, 2005
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.: *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 2004
- Hušek, R., Lauber, J.: *Simulační modely*, SNTL, 1984
- Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991
- Banks, J.: *Handbook of Simulation*, Wiley, 1998
- Seila, A.F., Cerić, V., Tadikamalla, P.: *Applied Simulation Modeling*, Thomson, 2003
- Křivý, I., Kindler, E.: *Simulace a modelování*, skript Ostravské univerzity, 2001
- Kavička, A.: *Syllaby k predmetu Diskrétní simulace*, DFJF, Univerzita Pardubice
- <http://www.cs.uml.edu/~glam/Mikeell/>
- <http://www.cse.msu.edu/~cse808/notes/>
- <http://www.sce.carleton.ca/course/94501/s02/>
- <http://stat-www.berkeley.edu/~stark/java/html/chiHilite.htm>
- <http://mindyourdecisions.com/blog/2013/06/21/what-do-deaths-from-horse-kicks-have-to-do-with-statistics/#VhzO4ayovRY>
- www.wikipedia.com

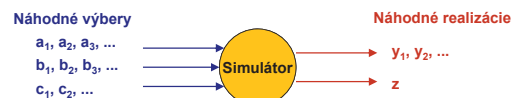


Analýza výsledkov simulačných experimentov

Prednáška č. 6

Modelovanie a simulácia
doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

Random In => Random Out



- Náhodné vstupy => náhodné výstupy (RIRO)
- (jeden) Simulačný beh — aký má význam?
 - Bola to „typická“ situácia?
 - Medzi jednotlivými behmi sú rozdiely
- Potrebne vykonať niekoľko behov - replikácií



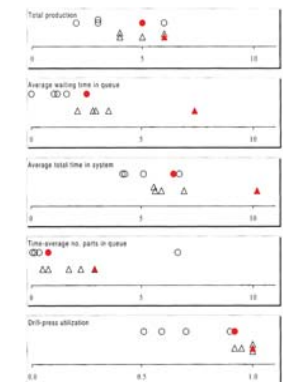
Replikácia

- **Replikácia** je spustenie simulačného experimentu **s rovnakými parametrami** (konfiguráciou, inicializačným stavom) ale **s odlišným prúdom (násadou) generátora náhodných čísiel**, ktorý generuje vstupné veličiny



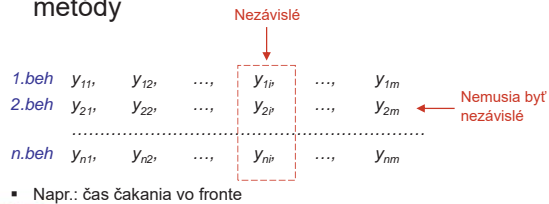
Lisovňa

- Kruhy (originál)
- Trojuholníky (2-nás. intenzita príchodu)
- 1. replikácia je červená



Nezávislosť výstupných hodnôt

- $y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}$ nemusia byť IID
- Nemôžeme použiť niektoré štatistické metódy



- Napr.: čas čakania vo fronte



Štatistické spracovanie výsledkov

- Jedna konfigurácia
- Porovnanie dvoch alebo viacerých konfigurácií
- Hľadanie optimálnej konfigurácie
- Ignorovanie štatistickej analýzy
 - Nemáme predstavu o presnosti výsledkov



Typy simulácie

- **S ukončením**
- **Bez ukončenia**
 - S ustálenými parametrami
 - S cyklickými parametrami
 - S inými parametrami



Simulácia s ukončením

- **Terminating simulation**
 - Existuje prirodzená udalosť v reálnom systéme, ktorá v simulátore znamená koniec simulácie
(napr. koniec pracovnej smeny, vyrobenie daného počtu výrobkov, ...)
 - Dané počiatočné a koncové podmienky
 - Simulačný čas je konečný a dobre definovaný
 - Počiatočná situácia má vplyv na výsledky



Simulácia bez ukončenia

- **Steady-state simulation**
 - Dlhý beh („nekonečný“)
 - Nie sú dané podmienky ukončenia simulácie
 - Počiatočné podmienky nemajú teoreticky vplyv (prakticky ho však majú)
 - Pozor pri spracovaní výsledkov!



Aký typ simulácie?

- Väčšinou je to dané cieľmi štúdie
 - Príklad: Výrobná linka (16 hodín denne, Po-Pi)
 - S ukončením: ako dlho trvá, kým sa výroba naplno „rozbehne“
 - Bez ukončenia: aká bude priepustnosť systému po zapracovaní pracovníkov a zábehu systému
- Použitie simulácie s ukončením je niekedy dané fungovaním systému
- Nie vždy to musí byť jasné



Simulácia s ukončením



Zber výstupných dát

- Metóda nezávislých replikácií
 - Vykonávame IID replikácie (minimálne 4-5, radšej 10 alebo viac)
- Výsledky pre jednotlivé replikácie si uložíme

Replication	Daily Profit	Daily Late Wait Jobs
1	\$ 475.43	0.6500
2	525.17	0.6500
3	513.98	0.5500
4	389.42	0.6000
5	513.96	0.7000
6	401.20	1.0500
7	450.52	0.6500
8	388.71	0.9000
9	574.67	0.4000
10	565.81	0.2500



Spracovanie výstupných dát

- Výsledky je nutné štatisticky spracovať a určiť intervaly spoľahlivosti pre jednotlivé veličiny

	Daily Profit	Daily Late Wait Jobs
Sample Mean	\$ 479.89	0.6400
Sample Standard Deviation	70.17	0.0510
95% Confidence Interval Half Width	50.20	0.1616
Minimum Summary Output Value	388.71	0.2500
Maximum Summary Output Value	574.67	1.0500



Určenie intervalov spoľahlivosti

- Stredná hodnota $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$
- Rozptyl $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$
- Interval spoľahlivosti $\bar{X} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$



Intervaly spoľahlivosti

- Hodnota ktorú hľadáme (μ) je vlastne priemerom z nekonečného počtu replikácií

95% IS je taký náhodný (iná sada replikácií poskytne iný interval) interval, ktorý s 95% pravdepodobnosťou obsahuje túto hľadanú hodnotu
(Ak by sme urobili mnoho krát po napr. 50 replikáciách a zakaždým vytvorili IS, približne 95% z týchto intervalov by obsahlo hľadanú (ale neznámu) hodnotu (μ))



Intervaly spoľahlivosti

- 95% IS nie je interval, do ktorého padne 95% nameraných hodnôt veličiny z replikácií!
- Výpočet IS predpokladá IID a normálne rozdelenie dát
 - Dáta väčšinou nie sú normálne rozdelené (lepšie sú na tom priemerné hodnoty, ako extrémny)
 - CLV – pri veľkom n je to v poriadku



Koľko replikácií

- Vždy minimálne 4 – 5
- Záleží od toho, akú presnosť chceme dosiahnuť (half width)

$$h = t_{n-1, 1-\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \Rightarrow n = t_{n-1, 1-\alpha/2}^2 \frac{s^2}{h^2}$$

$$1. \quad n \cong z_{1-\alpha/2}^2 \frac{s^2}{h^2} \quad \text{n rastie kvadraticky so znižujúcim sa h!}$$

$$2. \quad n \cong n_0 \frac{h_0^2}{h^2} \quad \begin{array}{l} n_0 - \text{počet „úvodných“ replikácií} \\ h_0 - \text{half-width z „úvodných“ replikácií} \end{array}$$



Porovnávanie výsledkov dvoch rôznych konfigurácií

- Urobíme behy => výsledky, IS, ..., skontrolujeme, či sa intervaly prekrývajú
 - Napr.:
 - Základná konfigurácia: 492.63 ± 13.81, alebo [478.82, 506.44]
 - Zlepšená konfigurácia: 564.53 ± 22.59, alebo [541.94, 567.12]
- Zdá sa to síce rozumné, ale nie je to celkom správne



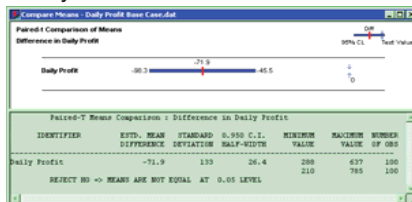
Porovnávanie výsledkov dvoch rôznych konfigurácií

- Arena Output Analyzer
 - Súčasť balíka Rockwell Arena
 - Aplikácia na štatistickú analýzu výsledkov simulačných behov
- Vykonáme dvojzložkový t-test
- Výsledkom je 95% interval spoľahlivosti pre rozdiel porovnávaných hodnôt



Porovnávanie výsledkov dvoch rôznych konfigurácií

- Ak získaný interval neobsahuje 0, je medzi porovnávanými alternatívami štatisticky významný rozdiel



Simulácia bez ukončenia s ustálenými parametrami



Steady-state simulácia

- Spracovanie výsledkov je náročnejšie ako pri simulácii s ukončením
- Naozaj je potrebné vykonávať tento druh simulácie?
- Vykonávame dlhý simulačný beh
- Po fáze zahrievania sa model dostane do ustáleného stavu
- Problém je, že výstupné hodnoty sú **autokorelované**



Začiatkový stav

- Väčšinou modely začínajú
 - prázdne
(v systéme sa nenachádzajú žiadne entity)
 - nečinné
(žiadny zdroj obsluhy nepracuje)
- V simulácii s ukončením je to v poriadku (ak to zodpovedá modelovanému systému)
- V simulácii bez ukončenia to však môže ovplyvniť výsledky
(Spôsob ovplyvnenia je závislý od konkrétneho modelu)



Začiatkový stav

- Ako zabrániť vplyvu začiatkového stavu na výsledky?
 - Začať s naplneným systémom
 - Problém - ako vieme ako má model v danom čase vyzerat?
 - Simulovať tak dlho, že sa vplyv zač. stavu stratí
 - V istých prípadoch môže fungovať
 - Nechať model „zahriať“
 - Výsledky začneme zbierať až po zahriatí, keď sa systém nachádza už v ustálenom stave



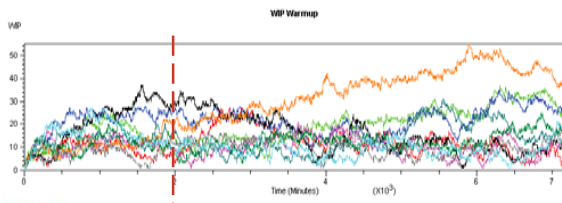
Zahrievanie (Warm-up, Transient period)

- Ako určiť kedy skončí fáza zahrievania?
 - Priemer (nie je príliš vhodný)
 - Priemer cez replikácie
 - Kízavý priemer (Welchova metóda)
 - Eyeballing („Od oka“)
- Rôzne procesy môžu mať rôznu rýchlosť zahrievania – treba vziať maximálnu hodnotu



Eyeballing

- Nakresliť si grafy výstupných hodnôt a od oka určiť, kedy sú stabilné
- Pozor na variabilnosť pri replikáciách – sledovať viac replikácií
- Sledovať prípadné zahlienie systému



Metódy pre získanie IID dát

- Metóda skrátených replikácií
(Truncated replications, Replication-deletion)
- Metóda dávok
(Batch means method)
- Regeneratívna metóda
(Regenerative method)
- Spektrálna metóda
(Spectral estimation method)

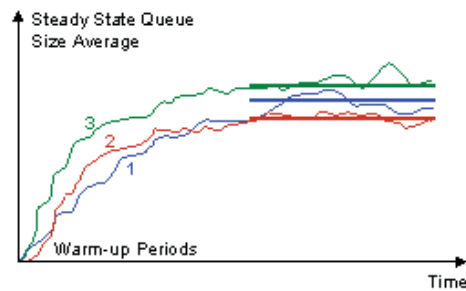


Metóda skrátených replikácií

- Identifikujeme dobu zahrievania
- Vykonáme n nezávislých replikácií pričom vždy zbierame dáta až po ustálení systému
- Ďalej pokračujeme ako pri analýze simulácie s ukončením
- Ak vyžadujeme vyššiu presnosť
 - Simulujeme dlhšie pri každej replikácii
 - Urobíme viac replikácií
- Problém ak je fáza zahrievania dlhá – replikácie môžu byť časovo náročné



Metóda skrátených replikácií

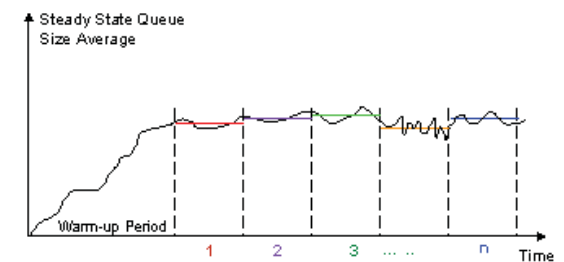


Metóda dávok

- Použijeme len jeden **veľmi** dlhý beh
- Problém – máme iba jednu replikáciu (dáta nie sú IID => nesmieme ich použiť!)
- Rozdelenie výsledkov do niekoľkých dávok (Zahrievanie vylúčime)
- Pre každú dávku vypočítame priemer (Batch mean), ktoré môžeme považovať za IID náhodné premenné

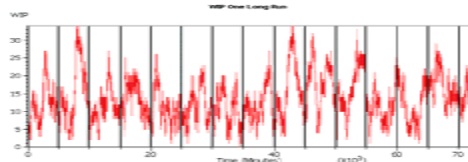


Metóda dávok



Metóda dávok

- Ako voliť dávky?
 - Dávka musí byť dostatočne veľká, aby nebola korelovaná s nasledujúcimi dávkami
 - Dávka musí obsahovať dostatočné množstvo



Metóda dávok

- Použijeme len jeden **veľmi** dlhý beh
- Problém – máme iba jednu replikáciu (dáta nie sú IID => nesmieme ich použiť!)
- Rozdelenie výsledkov do niekoľkých dávok
- Pre každú dávku vypočítame priemer (Batch mean), ktoré môžeme považovať za IID náhodné premenné



Zhrnutie

- Výsledky simulačných experimentov je nutné štatisticky spracovať
- Rozlišujeme simuláciu s ukončením a bez ukončenia – líšia sa metódy spracovania výsledkov
 1. Ak je to možné, vyhnite sa simulácii bez ukončenia
 2. Ak nie využite metódu replikácií
 3. Ak sa nedá použiť metóda dávok



Použité zdroje

- Kavčíčka, A., Klíma, V., Adamko, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, EDIS, 2005
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.: *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 2004
- Hušek, R., Lauber, J.: *Simulační modely*, SNTL, 1984
- Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991
- Banks, J.: *Handbook of Simulation*, Wiley, 1998
- Sella, A.F., Cerić, V., Tadić, P.: *Applied Simulation Modeling*, Thomson, 2003
- Křivý, I., Kindler, E.: *Simulace a modelování*, skriptá Ostravské univerzity, 2001
- Kavčíčka, A.: *Sylaby k predmetu Diskrétní simulace*, DFJP, Univerzita Pardubice
- <http://www.cs.umd.edu/~gianni/mkell/>
- <http://www.cse.msu.edu/~cse808/note/>
- <http://www.sce.carleton.ca/courses/94501/s02/>

Simulačný projekt

Prednášky č. 7 a 8

Modelovanie a simulácia
doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

Úspešný simulačný projekt

- **Úspech definuje klient**
(zvyčajne ten kto platí)
- Simulačný projekt je posudzovaný podľa jeho aplikácie (využitia) u klienta a nie na základe technických parametrov
- Je dôležité vedieť, na základe akých kritérií sa bude projekt posudzovať

Úspešný simulačný projekt (pokr.)

Úspešný projekt poskytuje v **správnom čase** užitočné **informácie**, ktoré podporia zmysluplné **rozhodnutie**

Potrebné schopnosti

- Štatistika a základy teórie pravdepodobnosti
- Získanie znalostí o skúmanom systéme
- Programovanie
- Data management
- Grafika

Potrebné schopnosti (pokr.)

- Riadenie projektov
- Time management
- Schopnosť zamerať sa na dôležité veci
- Schopnosť pracovať v tíme
- Prezentovanie
- Komunikatívnosť
- ...

Fázy simulačného projektu

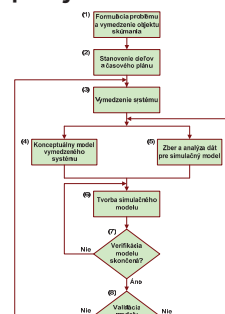
- Dve základné etapy:
 - Návrh a tvorba simulačného modelu
 - Experimentovanie s modelom
- Každá etapa má niekoľko fáz
- Fázy jednotlivých etáp sa môžu prelínať a vykonávať v rôznom poradí (i opakovane)



Fázy simulačného projektu (pokr.)

I. etapa

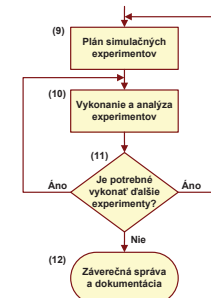
Návrh a tvorba
simulačného modelu



Fázy simulačného projektu (pokr.)

II. etapa

Experimentovanie
s modelom



1. Formulácia problému a vymedzenie objektu skúmania

- Nemodelujeme preto aby sme modelovali, ale preto, aby sme vyriešili daný problém
- Zákazník zriedkavo formuluje problém jasne
 - Máme veľké náklady na skladovanie výrobkov
 - Veľa zákaziek sa oneskoruje
 - Potrebujeme nasadiť simuláciu



- Potreba preformulovania problémov spolu so zákazníkom



1. Formulácia problému a vymedzenie objektu skúmania

- Problém musí byť jasne definovaný a odsúhlasený zákazníkom
- Je simulácia vhodným nástrojom na riešenie formulovaného problému?
- Vymedzenie objektu skúmania



Kedy nepoužívať simuláciu?

- Problém sa dá vyriešiť „zdravým sedliackym rozumom“
- Problém sa dá vyriešiť analytickými matematickými metódami
 - Teória hromadnej obsluhy
- Je ľahšie experimentovať s reálnym systémom



Kedy nepoužívať simuláciu?



- Náklady na simulačnú štúdiu presiahnu možné úspory
 - Niekedy je ťažké kvantifikovať úspory
- Na úspešné ukončenie projektu nemáme dostatok zdrojov
 - Ľudia, počítače, softvér, peniaze



Kedy nepoužívať simuláciu?



- Na projekt nie je dostatok času
 - Sklon zákazníkov využívať simuláciu až na konci projektu
 - Projekt, ktorého výsledky sa nevyužijú môže byť považovaný za neúspešný
- Nie je dostatok dát
 - Neexistujú ani podložené odhady
- Model nie je možné verifikovať/validovať



Kedy nepoužívať simuláciu?



- Nie je možné splniť očakávané ciele
 - Dôležité je poučiť' zadávateľa o možnostiach simulácie – majú príliš veľké očakávania
 - Nepreceniť svoje sily
- Činnosť systému je príliš komplikovaná alebo ju nie je možné definovať
 - Komplexné správanie sa ľudí v krízových situáciách



2. Stanovenie cieľov a plánu



- Ciele určujú otázky, na ktoré má model odpovedať
 - Presné, zdôvodnené, merateľné
 - Stanovenie otázok (rozdelenie podľa dôležitosti)
 - Stanovenie kritérií a jednotiek (KPI - Key Performance Indicators)



2. Stanovenie cieľov a plánu



- Štúdium modelovaného systému
 - Nie je možné modelovať niečo, čomu nerozumieme
 - Najlepšie je ísť na „miesto činu“
 - Komponenty systému
 - Prevádzka systému
 - Rozhovory s pracovníkmi
 - Popis systému (náčrt)



3. Vymedzenie systému



- Vymedzenie systému (abstrakcia)
- Špecifikácia systému a modelu:
 - Ciele projektu
 - Popis modelovaného systému
 - Spôsob modelovania
 - Spôsob animácie
 - Vstupy a výstupy
 - Prínosy modelu



Celkový plán



- Celkový plán projektu:
 - Ciele
 - Špecifikácia
 - Časový plán projektu (míľniky)
 - Potrebne zdroje (ľudské, materiálne)
- Plán projektu musí byť odsúhlasený všetkými partnermi (kredibilita)



Vykročte pravou nohou



- Klienta treba uistiť, že vy ste ten správny tím
- Úvodné stretnutie (*kick-off meeting*)
 - Účasť **manažmentu**, zodpovedných pracovníkov, ľudí z prevádzky (len kompetentné osoby)
 - Predstavte tím
 - Informujte o dôvode projektu, cieľoch, pláne, ...
 - Diskutujte (prijímate návrhy)
 - Sledujte správanie ľudí – vytipujte si kontaktnú osobu (*project champion*)
 - **Získanie podpory a záujmu**



Riešte správny problém



- Správne riešenie nesprávneho problému je na nič
- Písomné stanovenie jasných cieľov
- Dôležité je splnenie cieľov, nie ukončenie projektu



Držte očakávania na uzde



- Očakávania klienta sú zvyčajne prehnane
- Očakávania musia byť v súlade s cieľmi projektu
- Dôležité je upozorniť na to, čo model bude vedieť a čo nie
- Očakávania treba kontrolovať neustále



Komunikácia je dôležitá



- Správne riešenie začína správnou otázkou
 - Nekláste otázky, na ktoré sa dá odpovedať áno/nie
 - Prečo ste to urobili takto? <-> Na základe čoho sa rozhodujete, ako to urobíte?
- Buďte dobrý poslucháč
 - Najprv problém pochopíte, až potom riešte
 - Treba vnímať potreby zákazníka
- Neustála komunikácia
 - Zákazník musí odsúhlasiť ciele a postup
 - Zákazník musí byť informovaný (road map)



Odhadnite výsledok



- Len ak viete, kde ste začali, môžete povedať ako ďaleko ste zašli
- Požiadajte zákazníka o hrubú analýzu problému
 - Poskytnite vám to odhad
 - Nesmie to však ovplyvniť ďalší postup
 - Zákazník si na konci uvedomí prínos projektu



4. Konceptuálny model



- Zvolenie vhodnej koncepcie pre tvorbu modelu
 - udalostná, procesová, agentová
- Vytvorenie konceptuálneho modelu
 - Špecifikuje základné funkčné a riadiace časti
 - Úroveň detailov – len toľko, koľko je nutné, aby sme splnili ciele projektu
- Obvykle už aj výber jazyka alebo prostredia, v ktorom bude model realizovaný



Úroveň detailov



- Začínať so strednou úrovňou detailov
- Detailnosť ovplyvňujú:
 - Ciele projektu
 - Potreba merateľných veličín
 - Kredibilita modelu
 - Dáta
 - Názory expertov
 - Analýza citlivosti na zmenu parametrov
 - Iné obmedzenia (počítač, čas, peniaze)



5. Zber a analýza dát



- „Garbage in – garbage out“
- Zber vstupných dát
 - Rozhodnutie o spôsobe modelovania vstupov (deterministické/stochastické, rozdelenia pst)
 - Získanie dát
 - „Vždy zaberie viac času, ako sa predpokladalo“
 - Môže zaberať až 30% času projektu!
- Zber dát popisujúcich parametre výkonu systému (pre neskoršiu validáciu)



5. Zber a analýza dát



- Rôzne zdroje vstupných dát
 - Historické záznamy
 - Pozorovanie
 - Podobné systémy
 - Odhady expertov
 - operátori
 - dodávateľia
 - dizajnéri
 - Teoretické odhady



Pochybujte o dátach



- Aj keď zákazník tvrdí, že má všetky dáta, ktoré potrebujete:
 - Sú dáta správne?
 - Ako boli dáta zozbierané?
 - zdroj, čas, spôsob
 - Zodpovedajú požadovanej úrovni detailov?



Odhady môžu pomôcť



- Zber dát je na kritickej ceste projektu
- Ak nie sú dáta k dispozícii nemusí to ale zdržať celý projekt -> odhad (predpoklad)
- Odhady sa môžu neskôr spresniť (ak to bude potrebné)



6. Implementácia modelu



- Tvorba počítačového modelu
- Voľba prostredia (jazyka)
 - Všeobecný jazyk
Java, C++, C#, Pascal, ...
 - Simulačný jazyk
Simula, SIMAN, ...
 - Simulačný balík
všeobecný: AnyLogic, Arena, SimScript, Extend, Simul8, ...
špecializovaný: Witness, SimFactory, ProModel, ...



Sústred'te sa na problém



- Dôležité je vyriešiť problém, nie vytvoriť model
- Viac času na experimentovanie, menej na programovanie modelu
- Stanovte si viac čiastkových míľnikov
- Kontrolujte smerovanie projektu počas procesu implementácie



Neprekomplikujte to



- Nezabúdajte, že vytvárate **len model**
- Detaily pridávajte postupne
- Model nesmie byť „múdrejší“ ako reálny systém
- Výsledky modelu musia byť využiteľné v reálnom systéme
(Napr. nepoužívať riadiace postupy v modeli, ktoré sa v realite nedajú použiť)



7. Verifikácia modelu



- Zodpovedá implementovaný model, konceptuálnemu modelu a špecifikácii alebo
- **Je model naprogramovaný správne?**
- „Žiadny program nefunguje na prvý raz.“
- Treba vykonávať priebežne



7. Verifikácia modelu



- Techniky verifikácie
 - Debuggovanie
 - Rozdelenie programu do menších blokov
 - Kontrola kódu druhou osobou
 - Trasovanie (step-by-step)
 - Testy vstupných generátorov
 - Testy s kombináciami vstupných parametrov a zjednodušeniami
 - Pozorovanie animačného výstupu



8. Validácia modelu



- **Je model správnou reprezentáciou modelovaného systému?**
- Môžeme pre experimentovanie nahradiť reálny systém týmto modelom a získať vierohodné výsledky?

Použitie výsledkov zo zlého simulačného modelu je horšie ako nesimulovať vôbec



8. Validácia modelu



Spôsoby validácie modelov:

- Porovnávanie s realitou
Štatistické porovnanie správania simulátora so správaním simulovaného systému
- Porovnávanie s iným modelom
Např. matematický model alebo iný validný sim. model
Ak nie je k dispozícii existujúci systém
- Empirická validácia
Posúdenie modelu expertom (zákazníkom) - *Face validity*



8. Validácia modelu



- Neexistuje úplne validný model, iba **dostatočne validný model**
- Náročnosť validácie závisí od komplexnosti modelu a od existencie modelovaného systému
- Zvyšovanie validity nad istú hranicu môže byť pridrahé
- Model, ktorý je validný pre jeden cieľ, nemusí byť validný pre iný



8. Validácia modelu



- Validácia by mala byť vykonávaná na veličinách, ktoré sa použijú pri rozhodovaní
- Validáciu treba vykonávať priebežne počas celého projektu
- Validácia a verifikácia sa často prelínajú
- Úspešná validácia nezaručuje, že výsledky modelu budú využité



Riadte zmeny



- Zmenám sa nedá zabrániť
- Súhlaste so zmenami, len ak je to nutné
- Zmeny sa možno dajú odsunúť na neskôr
- Zákazník by sa mal zúčastňovať na procese prijímania zmien
- Všetky požiadavky na zmenu písomne
- Po každej zmene je nutné model opätovne verifikovať a validovať
- Pozor na zmeny v tíme (výmena ľudí)



9. Plán experimentov



- Experimenty plánujeme tak, aby ich postupné vykonávanie viedlo k dosiahnutiu cieľov projektu
- Máme k dispozícii obmedzené prostriedky (čas, ľudia, ...)
- Ťažko zostaviť fixný nemenný plán (niekedy sa nedá zostaviť žiadny)
- Výsledky experimentov ovplyvňujú ďalší postup



10. Vykonanie a analýza experimentov



- Výsledky experimentov je nutné spracovať **štatistickými metódami**
- Pre každý experiment stanovujeme
 - Dĺžku simulačného behu
 - Počet replikácií
 - Čas zahrievania (*Warm-up period*)



Analýza experimentov



- Preverujte výsledky
(dávajú zmysel, dajú sa vysvetliť)
- Porovnajte výsledky s odhadom zákazníka na začiatku projektu
- Poznajte obmedzenia a hranice modelu
 - Model podporuje rozhodovanie, nenahrádza ho.
- Ukážte radšej niekoľko možností, ako len jeden výsledok
- Prezentujte úspechy okamžite a často



11. Ďalšie experimenty?



- Na základe analýzy výsledkov vykonaných experimentov je potrebné rozhodnúť, či bol dosiahnutý cieľ projektu alebo je potrebné vykonať ďalšie experimenty?

Treba vedieť kedy prestať



- Vždy sa dá urobiť viac
- Nie vždy je efektívne urobiť viac
- Počas projektu je potrebné dohodnúť so zákazníkom jeho rozsah



12. Záverečná správa a dokumentácia



- Dokumentácia projektu
 - Dokumentovať! Dokumentovať! Dokumentovať!
 - Potrebne vykonávať priebežne
 - Project log
 - Možné ďalšie využitie modelu
 - Dodržujte štandardy
(aj pri práci na malých modeloch)

12. Záverečná správa a dokumentácia



- Záverečná správa
 - Prezentuje výsledky projektu (dosiahnuté ciele) – môže rozhodovať o tom, či sa využijú
 - Obsahuje:
 - výsledky
 - dokumentáciu modelu
 - popis programu
 - postup analýzy
 - popis experimentov

Záverečná správa a dokumentácia



- Záverečná správa
 - Vždy priložte *Executive summary*
(~1 strana)
 - Poskytnite prehliadač simulačného modelu
 - Naznačte smery ďalšieho postupu
 - Vyhradte si dostatok času na jej spracovanie
 - Prezentácia je veľmi dôležitá

13. Aplikovanie výsledkov

Projekt, výsledky ktorého sa nepoužijú je neúspešný

- Simulačný projekt je posudzovaný podľa jeho aplikácie (využitia) u klienta a nie na základe technických parametrov
- Použitie (aplikovanie) výsledkov projektu závisí od **kredibility modelu**

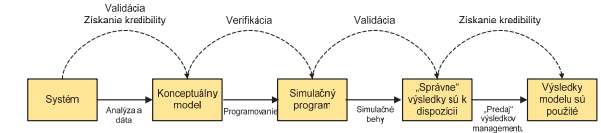


Kredibilita modelu

- Ak je model považovaný klientom za validný a jeho výsledky sú použité pri rozhodovaní, je tento model **kredibilný**
- Kredibilita je reprezentovaná ochotou ľudí, založiť svoje rozhodnutia na výsledkoch modelu.



Kredibilita modelu



Kredibilita modelu



- Ako ju získať:
 - Klient rozumie a súhlasí so zjednodušeniami v modeli
 - Model bol preukázateľne verifikovaný a validovaný
 - Klient je súčasťou projektu (komunikácia s klientom)
 - Simulačný tím má dobrú povest' (referencie)



Kredibilita modelu

- Sľubujte len to, čo viete splniť!
- Vždy splňte to, čo ste sľúbili!
- Verte si!
- Správajte sa diplomaticky!
- Zapojte dôležitých ľudí (tí, ktorí budú rozhodovať o použití výsledkov) do projektu!



Dôvody neúspechu

- Nedefinovaný jasný a dosiahnuteľný cieľ
- Zlé plánovanie, nesprávny odhad potrebných zdrojov
- Nevhodné zloženie tímu
- Nedostatok dôvery a podpory od manažmentu
- Nedostatočná účasť zákazníka



Dôvody neúspechu (pokr.)

- Nesprávna úroveň detailov (priveľa)
- Nevhodný simulačný software
- Priskoré programovanie
- Nevhodné modelovanie vstupných dát
- Nesprávne vyhodnotenie výsledkov simulácie
- Zneužívanie animácie



Použité zdroje

- Kavička, A., Klima, V., Adamko, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, EDIS, 2005
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.: *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 2004
- Hušek, R., Lauber, J.: *Simulační modely*, SNTL, 1984
- Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991
- Banks, J.: *Handbook of Simulation*, Wiley, 1998
- Seila, A.F., Cerić, V., Tadikamalla, P.: *Applied Simulation Modeling*, Thomson, 2003
- Křivý, I., Kindler, E.: *Simulace a modelování*, skriptá Ostravské univerzity, 2001
- Kavička, A.: *Sylaby k predmetu Diskrétní simulace*, DFJF, Univerzita Pardubice
- <http://www.cs.umd.edu/~glam/Mikkel/>
- <http://www.cse.msu.edu/~cse808/node/>
- <http://www.sce.carleton.ca/courses/94501/s02/>



Modelovanie komplexných systémov

Prednáška č. 9

Modelovanie a simulácia
doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

Vlastnosti komplexných systémov

- Emergencia
- Nelineárne vzťahy
- Spätná väzba
(Komplexné Adaptívne Systémy)
- Samo-organizovanie
- Hierarchická štruktúra
- Skoro dekomponovateľnosť



Problémy skúmania komplexných systémov

- Komplexné systémy nie sú intuitívne, ľudia však uvažujú intuitívne
- Problémy:
 - Redukcionistický prístup („Rozdeľuj a panuj“)
 - Lineárne uvažovanie
 - Krátkodobý výhľad
 - Zjednodušovanie príčin, zanedbávanie vzťahov
 - Ovplyvnenie zažitými paradigmami (pohľadom na svet, očakávanými výsledkami)



Simulácia komplexných systémov

- **Systémová dynamika** (System Dynamics)
 - Vysoká úroveň agregácie prvkov systému (prvky nemajú individualitu, sú reprezentované súhrnne)
 - Holistický prístup
- **Agentový prístup** (Agent paradigm)
 - Individuálna reprezentácia jednotlivých prvkov systému a ich vzájomných interakcií



SYSTÉMOVÁ DYNAMIKA

System Dynamics

- Jay W. Forrester (50. roky 20. storočia)
- Abstrahuje od jednotlivých entít a udalostí
= systémový pohľad – Systems Thinking
- Správanie systému je reprezentované pomocou hladín, tokov a (spätných) väzieb

System Dynamics

- Zvyčajne dlhodobé strategické modely
- Oblasti využitia:
 - Manažment
 - Urbanistika
 - Ekonomika
 - Sociológia
 - Ekológia
 - Biológia
 - ...

Systémové myslenie

- Využívame globálny pohľad, nadhľad so zanedbaním nepodstatných detailov
- Príčiny javov hľadáme v systéme, nie v externých faktoroch
- Sústreďujeme sa na dynamiku systému, nie iba na udalosti
- Dôraz na vzájomné vzťahy, ktoré nemusia byť lineárne a nezávislé, uvedomenie si spätých väzieb
- Dlhodobé uvažovanie

Vytvorenie modelu v SD

- Identifikácia prvkov systému
- Mentálny model
 - Kauzálné diagramy (*Causal loops diagrams*)
 - Diagramy hladín a tokov (*Stock and flow diagrams*)
- Formalizácia modelu
 - Definovanie rovníc
 - Hodnoty konštánt
 - ...

Causal loops diagrams

- Definujú vzťahy medzi prvkami modelu
- Uzly sú premenné/veličiny
- Hrany definujú kauzálne vzťahy (pozitívne +/- negatívne -)
- Identifikácia slučiek spätnej väzby (Reinforcing, Balancing)



Stock and flow diagrams

- Hladiny (Stocks, Levels)
- Toky (Flows, Rates)
- Závislosti (Links)
- Hodnoty (Information)
- Oneskorenia (Delays)

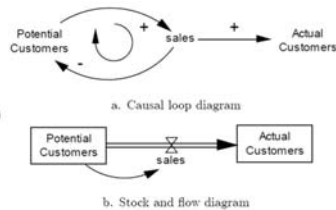
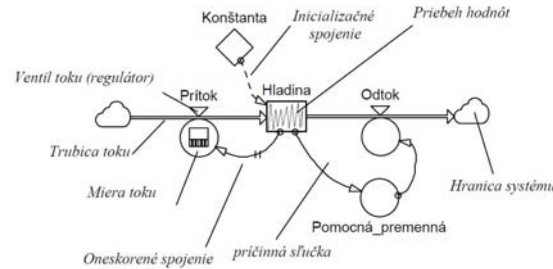


Diagram hladín a tokov



Modelovanie v SD

- Na základe znalosti správania sa systému (porovnaním s typickými správaniami) sa využijú návrhové vzory (špecifická kombinácia väzieb, ktorá produkuje dané správanie), následne sa hľadajú faktory, ktoré dané správanie systému spôsobili



Módy správania sa systémov

- Lineárny vývoj
 - Bez spätnej väzby
- Exponenciálny rast
 - Pozitívna spätná väzba

Módy správania sa systémov

- Približovanie sa k danej hodnote
 - Negatívna spätná väzba
 - Goal seeking behaviour
- Oscilácia
 - Negatívna spätná väzba s oneskorením

Módy správania sa systémov

- Logistický vývoj
 - Kombinácia pozitívnej a negatívnej spätnej väzby
 - S-shape
- Prestrelenie a kolaps
 - Kombinácia pozitívnej a neg. spätnej väzby
 - Overshoot and colaps



Nástroje pre SD modelovanie

- Stella
- VenSim
- Powersim
- Insight Maker
- AnyLogic



Lotka-Volterra model

- Modeluje populácie predátorov a koristi (Predator-Prey)
- Zajac (X)
- Rys (Y)
- $dX/dt = a.X - b.X.Y$... koristi'
- $dY/dt = c.X.Y - e.Y$... Predátori
- <http://runthamodel.com/models/194/>



World model

- Club of Rome
- J. Forrester: *World Dynamics* (1971)
- D. Meadows et al.: *Limits to Growth* (1972, The 30-Year Update 2004)
- World3 model sleduje rôzne aspekty vývoja ľudstva
 - Potraviny
 - Priemysel
 - Populácia
 - Nerastné suroviny
 - Znečistenie životného prostredia
- <http://www.world3simulator.org/>
- <http://insightmaker.com/insight/1954>



AGENTOVO ORIENTOVANÝ PRÍSTUP SKÚMANIA KOMPLEXNÝCH SYSTÉMOV



Paradigma agentov

- Paradigma agentov (a z nej vychádzajúce agentovo orientované architektúry) poskytuje možnosti na modelovanie komplexných systémov, ktoré sú prostredníctvom iných modelovacích techník (napr. udalostne orientovaná simulácia) obtiažne zvládnuteľné.
- Pôvod v oblasti umelej inteligencie



Agent

Zapuzdrený počítačový systém* zasadený do nejakého prostredia, ktorý v ňom pružne a autonómne pôsobí za účelom plnenia daného cieľa

[Wooldridge, Jennings 1995]

* Môže byť SW ale aj HW agent, my sa venujeme výlučne softvérovým agentom



Kľúčové vlastnosti agenta

- **Autonómnosť**

t. j. agent je schopný pracovať samostatne bez vonkajších intervencií a úplne riadiť svoje výkony a kontrolovať svoj vnútorný stav

- **Spoločenské správanie**

ktoré sa prejavuje ako interakcia s inými agentmi (resp. s človekom) prostredníctvom istého komunikačného mechanizmu/jazyka



Kľúčové vlastnosti agenta (pokr.)

- **Reaktivita**

alebo reagovanie na podnety z okolitého prostredia

- **Iniciatívnosť (Pro-aktívne správanie)**

tzn. že agent nereaguje iba na podnety z okolitého prostredia, ale je schopný správať sa cielene vyvíjaním vlastnej iniciatívy (podporovanej schopnosťou učenia sa).



Klasifikácia agentov

- Pre samotnú technickú realizáciu agenta je možné využiť rôzne koncepčné prístupy

- rôzne potreby daných typov aplikácií, v ktorých majú byť agenti použiti
- rôzny dôraz na jednotlivé vlastnosti

- Agentov môžeme členiť podľa rôznych kritérií

(Problematika možných klasifikácií agentov nie je zatiaľ v odbornej komunite uzavretá)



Klasifikácia agentov

- Podľa mobility

- **Statickí** agenti
- **Mobilní** agenti

- Podľa miery iniciatívnosti agenta

- **Uvažujúci (deliberatívni)** agenti
- **Reaktívni** agenti



Klasifikácia agentov

- Podľa aplikačného poslania

- Napr.: internetový agent, informačný agent

- **Hybridní** agenti

- **Heterogénne agentové systémy**

- Agenti rôznych typov



Klasifikácia agentov

- Zjednodušenie klasifikácie:

- kooperatívni agenti
- agenti rozhrania
- mobilní agenti
- informační/internetoví agenti,
- reaktívni agenti,
- hybridní agenti
- inteligentní agenti



Reaktívny agent

- Pri jeho tvorbe sa nevytvára žiaden apriórny plán jeho budúceho správania.
- Pozostáva z kolekcie modulov, ktoré pracujú autonómne a sú zodpovedné za špecifické úlohy (napr. za vykonávanie senzorických aktivít, výpočtových činností a pod.)
- Pôsobenie reaktívnych agentov pripomína skôr činnosť senzorických systémov než činnosť systémov s prvkami umelej inteligencie.



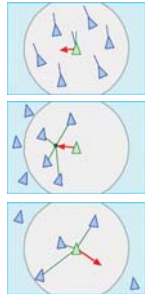
Reaktívni agenti

- Inteligentné agentové systémy môžu byť postavené na jednoduchých (reaktívnych) agentoch, pričom inteligencia týchto systémov „sa objaví“ až v dôsledku celého súhrnu situačných interakcií rôznych agentov.



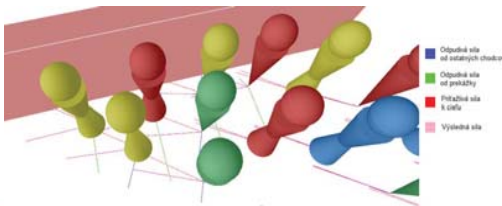
Let vtákov v krdli

- Letieť tam kam ostatní
Alignment
- Držať spolu
Cohesion
- Nechať si odstup na mávanie krídlami
Separation



Modelovanie pohybu chodcov

- Zložením jednoduchých sociálnych síl (vektorov) vzniká „rozumné“ správanie.



Uvažujúci agenti

- Označovaní aj ako deliberatívni agenti
 - Pri svojej činnosti analyzujú a vyhodnocujú situáciu
 - Rozmýšľajú nad vhodnou akciou, prípadne pracujú podľa stanoveného plánu
- Protiklad reaktívnych agentov
 - Prechod bludiskom
 - DA – pomocou mapy a algoritmu pre nájdenie cesty
 - RA – náhodná voľba smeru, wall following, ...



Multi-agentový systém

- Na riešenie komplexných problémov je potrebné využitie niekoľkých agentov
 - sú organizovaní v definovanej štruktúre (napríklad hierarchickej),
 - navzájom spolupracujú na splnení cieľa (vzájomnou komunikáciou, výmenou informácií, znalostí, zdrojov a pod.).
- Agenti sú schopní vytvárať spoločenstvo
 - vysoký stupeň decentralizácie,
 - vysoká miera životaschopnosti jednotlivých členov spoločenstva (vyplýva z ich autonómnej podstaty).



Multi-agentový systém

- Systém, zložený z viacerých autonómnych agentov, ktorí navzájom spolupracujú za účelom splnenia cieľa, pričom tento cieľ nie je žiadny z nich schopný splniť samostatne
 - žiadny agent nemá prostriedky a schopnosti na vyriešenie daného problému,
 - neexistuje globálne riadenie systému,
 - dáta sú decentralizované a
 - vykonávanie prebieha asynchrónne.

Agenti a simulácia

- Agentové systémy majú mnohé vlastnosti, ktoré sa dajú výhodne využiť pri modelovaní komplexných systémov (napr. územne rozľahlé systémy, biologické spoločenstvá, ...)
- Agentovo orientované modely
 - dobre udržiavateľná, zrozumiteľná štruktúra modelu vychádzajúca z prirodzenej štruktúry systému
 - členenie na autonómne jednotky riadenia (komplexné obslužné systémy) alebo autonómnych jedincov (biologické spoločenstvá)

Agentovo orientovaná simulácia

- Modelovanie inteligentných entít
 - [Modely pohybu/evakuácie ľudí](#)
 - [Modely cestnej premávky](#)
- Modelovanie biologických entít
 - Reakcia buniek organizmu na vírus
 - [Rast buniek](#)
 - Šírenie chorôb v populácii
 - Biosystémy
- Geosimulácie
 - Urbanistický rozvoj miest
- Modelovanie komplexných systémov so zložitou štruktúrou
- ...



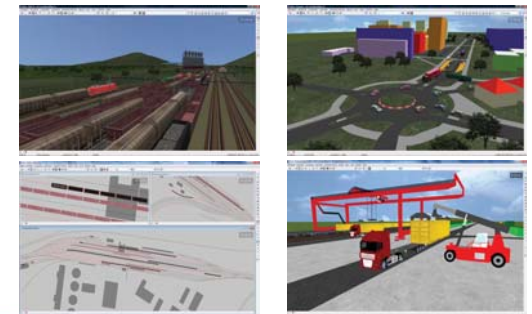
Tvorba agentovo orient. modelov

- Využitie existujúcej podpory pre agentovo orientované modelovanie
 - SeSAM (<http://www.simsesam.de/>)
 - REPAST (<http://repast.sourceforge.net/>)
 - SWARM (<http://www.swarm.org/>)
 - NetLogo (<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>)
 - AnyLogic (<http://www.anylogic.com/>)
- Vytvorenie vlastnej podpory
 - akým spôsobom majú byť implementovaní jednotliví agenti,
 - ako má byť zabezpečený mechanizmus ich komunikácie
 - aká koncepcia bude použitá na synchronizáciu simulačného výpočtu.

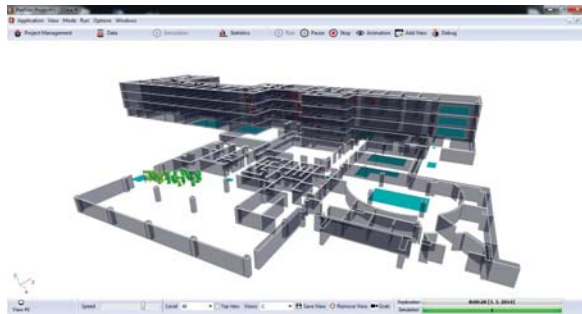
Architektúra ABASim

- Vyvíjaná na FRI
- Viacúrovňová agentovo orientovaná architektúra
 - Riadiaci agenti (hierarchická štruktúra)
 - Dynamickí agenti
 - Entity
- Podpora tvorby modelov obslužných systémov

Villon



PedSim



Diskrétna simulácia
© doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

42

Použité zdroje

- http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/club_rome_a.html
- <http://en.wikipedia.org/wiki/World3>
- <http://www.psychologyinaction.org/2012/10/07/classic-psychology-experiments-wason-selection-task-part-i/>
- Barry Richmond: An Introduction to Systems Thinking, ISBN 0-9704921-1-1
- Radek Pelánek: Modelování a simulace komplexních systémů, Nakladatelství Masarykovy univerzity, 2011, ISBN: 978-80-210-5318-2
- Eva Burianová: Simulace dynamických modelů s využitím metod systémové dynamiky, ISKI 2007 - Využití operačních systémů a počítačových sítí v podpoře výučby inženýrských předmětů
- <http://www.systemdynamics.org/DL-IntroSysDvn/>



Modelovanie a simulácia
© doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

43



Simulačný software

Prednáška č. 10

Modelovanie a simulácia
doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.

Implementácia simulačného modelu

- Voľba spôsobu implementácie (prostredia, programovacieho jazyka)
 - Všeobecný jazyk
C++, Pascal, Fortran, C#, ...
 - Simulačný jazyk
Simula, SIMAN, GPSS/H...
 - Simulačný nástroj
všeobecný: AnyLogic, Arena, Extend, ...
špecializovaný: SimFactory, AutoMod, ...



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

2

Všeobecný programovací jazyk

- Väčšina programátorov pozná aspoň jeden
- Široká dostupnosť (rôzne platformy)
- Vyššia flexibilita
- Vyššia rýchlosť vykonávania simulácie
- Nižšia cena softwaru (nie simulačnej štúdie)



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

3

Simulačný jazyk

- Poskytujú mnohé konštrukcie a dátové štruktúry uľahčujúce tvorbu simulačných modelov
- Kratší vývojový čas
- Menšie riziko vzniku chýb v programe
- Jednoduchšie udržiavateľný kód (zmeny)



Modelovanie a simulácia
© Ing. Norbert Adamko, PhD.

4

Simulačný nástroj

- Ľahšia tvorba modelu
- Redukcia písania kódu
- Ľahké úpravy modelu
- Menšie riziko vzniku chýb
- Automatický zber štatistík



Výber simulačného nástroja

- Vstupy
- Simulácia
- Výstupy
- Prostredie
- Výrobca / Dodávateľ
- Cena



Výber simulačného nástroja

- Identifikujte potrebné vlastnosti nástroja
(mnohé propagované vlastnosti nikdy nevyužijete)
- Neposudzujte len na základe áno/nie
(dôležité je vedieť podrobnejšie údaje o vlastnostiach nástroja)
- Všimnite si aj nežiadúce vlastnosti



Vstupy

- Štandardné užívateľské rozhranie
- Import CAD súborov (.DXF)
- Import/Export dátových súborov (veľké množstvo dát)
- Syntax (grafy, ...)
- Debugger
 - Monitorovanie priebehu simulácie
 - Fokus na časť modelu, napr. entitu
 - Zistenie hodnôt atribútov, ... (Watches)
 - Pozastavenie simulácie s možnosťou vykonania zmien (Pauza, Breakpoints, ...)
- Spolupráca s inými jazykmi (C++, VB, ...)
- Schopnosti analýzy vstupných údajov



Simulácia

- Rýchlosť
- Run-Time flexibilita (batching, automatický zber štatistík, generovanie scenárov, ...)
- Generovanie náhodných premenných z rôznych rozdelení
- Reset štatistík (Steady-state simulation)
- Nezávislé replikácie
- Užívateľské globálne premenné a atribúty
- Možnosť programovania dodatočných funkcií
- Prenositelnosť (rôzne HW platformy)



Výstupy

- Štandardizované reporty (priem. čakanie vo fronte, ...)
- Užívateľsky nastaviteľné reporty
- Podpora grafických výstupov
- Správa databáz
- Zápis výsledkov do súboru



Prostredie

- Jednoduchosť používania
- Jednoduchosť učenia
- Kvalita dokumentácie
- Animačné schopnosti
- Run-only verzia



Výrobca / Dodávateľ

- Stabilita
- Updaty/Upgrady
- Kompatibilita medzi verziami
- Užívateľská podpora



Informácie o simulačnom nástroji

- Referencie od používateľov nástroja
- Referencie konzultantov využívajúcich viac nástrojov
- Názory firiem tvoriacich podobné modely
- Stretnutia užívateľov
- Konferencie



Všeobecné simulačné nástroje

- **Arena**
- AnyLogic
- [Simio](#)
- SimProcess
- **ExtendSim**
- AweSim
- [Simul8](#)
- **OMNet++**



Simulačné nástroje orientované na priemyselné procesy

- [AutoMod](#)
- ProModel
- Taylor II
- Witness
- **Plant Simulation** (eMPlant)
- **FlexSim**



Iné špecializované nástroje

- [PSIM](#) (PowerSim)
- CASPOC (Power Electronics)
- MedModel
- ED simulator
- Project Simulator
- Process Simulator (MS Visio)



Nástroje založené na System Dynamics prístupe

- **Stella**
- I-think
- Vensim PLE
- **InsightMaker** (<https://insightmaker.com/>)



Nástroje pre agentovú simuláciu

- **SeSAm**
- Repast Symphony
- **NetLogo**
- **InsightMaker** (<https://insightmaker.com/>)
- PSI



Sim. nástroje orientované na dopravu

- [VICOS/VISSIM](#)
- [AIMSUN](#)
- **SimWalk**
- [OpenTrack](#)
- [RailSys](#)
- **Villon**
- **PedSim**



Podporný software

- **Proof Animation**
- ExpertFit
- Stat::Fit
- OptQuest



Použité zdroje

- Kavička, A., Klima, V., Adamko, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, EDIS, 2005
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T.: *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 2004
- Hušek, R., Lauber, J.: *Simulační modely*, SNTL, 1984
- Law, A.M., Kelton, W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991
- Banks, J.: *Handbook of Simulation*, Wiley, 1998
- Seila, A.F., Cerić, V., Tadikamalla, P.: *Applied Simulation Modeling*, Thomson, 2003
- Křivý, I., Kindler, E.: *Simulace a modelování*, skriptá Ostravské univerzity, 2001
- Kavička, A.: *Sylaby k predmetu Diskrétní simulace*, DF-JF, Univerzita Pardubice
- <http://www.cs.uml.edu/~jam/Miskell/>
- <http://www.cse.msu.edu/~cse808/node/>
- <http://www.sce.carleton.ca/courses/94501/s02/>



Upozornenie

- Tieto študijné materiály sú určené výhradne pre študentov predmetu Modelovanie a simulácia na Fakulte riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline.
- Reprodukovanie, šírenie (i časť) materiálov bez písomného súhlasu autora nie je dovolené.

doc. Ing. Norbert Adamko, PhD.
Katedra matematických metód a operačnej analýzy
Fakulta riadenia a informatiky
Žilinská univerzita v Žiline
Norbert.Adamko@fri.uniza.sk

