

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Modelování a simulace

Simulace provozu a vzniku poruch
v Panamském průplavu

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Autoři, zdroje	2
1.2	Ověření validity	2
2	Rozbor tématu a použitých metod/technologií	2
2.1	Použité postupy	2
3	Koncepce modelu	2
3.1	Zjednodušení modelu	3
3.2	Popis konceptu	3
4	Architektura simulačního modelu	3
4.1	Spouštění simulačního modelu	4
5	Podstata simulačních experimentů a jejich průběh	4
5.1	Experiment 1	4
5.2	Experiment 2	4
5.3	Experiment 3	4
6	Shrnutí simulačních experimentů a závěr	5
Přílohy		
A	Petriho síť	7

1 Úvod

V této práci je řešen postup přípravy a sestavování modelu [7, str. 7] pro simulaci [7, str. 8] průplavu lodí Panamským kanálem. Cílem tohoto experimentu je demonstrovat s pomocí simulace následky poškození jedné nebo více komor pro vyrovnání hladiny, které se nachází na obou koncích průplavu. Díky tomuto modelu a simulačnímu experimentu [7, str. 9] je možné pozorovat vzniklé prodloužení průplavu lodí, pokles celkového provozu kanálu a odhadnout celkový počet přeneseného nákladu průplavem. Simulovány jsou následky poškození komory na straně u Atlantického oceánu a následně obou komor průplavu.

1.1 Autoři, zdroje

Tuto práci vypracovali Adam Zvara (xzvara01) a Tomáš Matuš (xmatus37). Informace jsou čerpány z oficiálních stránek průplavu, zkoumání průplavu lodí z video záznamů a veřejně dostupných statistik. Statistiku popisují obvyklou délku průplavu, přibližný počet lodí za měsíc a celkové kapacity lodí plovoucích průplavem.

1.2 Ověření validity

Časové údaje, průměrné počty obsluhovaných lodí a obecné informace o provozu Panamského kanálu pochází z oficiálně zveřejněných statistik. Model přímo vychází z těchto údajů a po experimentech výsledky simulace reflektují reálné zatížení dvou komor pro loď typu Panamax.

Validaci je možné spustit příkazem `./panama -v` a její výstup bude uložen v souboru `simulation.out`.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Po příjezdu lodě k Panamskému kanálu z Atlantického oceánu loď vjíždí do komory. Tato komora slouží ke zvednutí lodí o 26 m [9] a vyrovnání hladiny s jezerem Gatun. Každá komora se skládá ze 3 menších komor. Naplnění jedné komory trvá v průměru 15 minut [3] ale po prozkoumání videozáznamů lodí plovoucích přes průplav je nutné přidat 10 minut pro navigaci lodě z/do komory. Celková doba průplavu jedné části komory je 35 minut, což pro celou komoru činí 105 minut. Dále loď pluje po jezeře Gatun ke druhé, výstupní komoře. Cesta přes jezero trvá v rozmezí 9 až 12 hodin [3], dle jiných zdrojů průměrně 11,48 hodiny [9]. Po příjezdu ke druhé komoře je loď snížena na hladinu Tichého oceánu a tím končí její průplav kanálem. Podobným způsobem lodě putují z Tichého oceánu do Atlantického. Frekvence příchodu nových lodí do kanálu je regulována rezervačním systémem [6].

Na obou stranách kanálu se nachází 2 komory, které jsou zaměřené na obsluhu lodí typu Panamax. Panamax představuje maximální možnou velikost lodě, která je schopná proplout Panamským průplavem do roku 2016, kdy byly vybudovány nové komory pro loď typu Neo-panamax [11]. Těmito komorami se model zabývá. Za den kanálem propluje zhruba 24 lodí typu Panamax [4].

Měsíčně je přes kanál převezeno kolem 43 mil. tun nákladu [2] z toho loď typu Neo-panamax tvoří zhruba 22 mil. tun [1] a Panamax zbylých 21 mil. tun.

2.1 Použité postupy

Pro návrh modelu jsou využity Petriho sítě [7, str. 123] vyučované na přednáškách a doplňujících domácích úkolech [5] v kursu Modelování a simulace na FIT VUT v Brně ¹.

Samotný model je vytvořen v programovacím jazyce C++ s využitím simulační knihovny SIMLIB [8]. Dodržen je standard C++11 ² a pro překlad je použit nástroj Make ³ a překladač GCC ⁴. Tyto technologie jsou vhodné pro řešení zadané problematiky, neboť poskytují potřebná rozhraní pro implementaci modelu. Velkou výhodou je, že se jedná o multiplatformní, otevřený a volně dostupný software.

3 Koncepce modelu

Tato sekce obsahuje návrh konceptuálního modelu [7, str. 41] Panamského kanálu, který můžeme považovat za systém hromadné obsluhy [7, str. 136]. Při vytváření modelu vycházíme z poznatků získaných z průzkumu v části 2. Jelikož jsou získané statistiky zprůměrované za období jednoho měsíce, model také představuje aktivitu v kanálu za jeden měsíc.

¹<https://www.fit.vut.cz/cs>

²<https://en.cppreference.com/w/cpp/11>

³<https://www.gnu.org/software/make/>

⁴<https://gcc.gnu.org/>

3.1 Zjednodušení modelu

Panamský průplav má v realitě celkem 3 komory. Třetí komora byla dostavena v roce 2016 a je primárně používána pro lodě typu Neo-panamax [10]. V tomto modelu se ale zaměřujeme na původní 2 komory, které jsou využívány pro lodě typu Panamax nebo menší, což nemá dopad na kvalitu modelu, protože nové komory jsou primárně používané loděmi typu Neo-Panamax a tedy je možné je modelovat jako separátní systém.

Dále je zjednodušená podoba komor na straně u Tichého oceánu, kde se nachází jedna a pak později další dvě. Toto je v našem modelu zjednodušeno do stejné podoby jako u komor u Atlantického oceánu, což při validaci modelu 5.1 nemělo viditelný dopad na kvalitu modelu.

Co se týče frekvence příchodu nových lodí, tak je možné nahradit systém rezervací za pravidelné generování příchodu lodí každou hodinu, protože v modelu nijak nepracujeme s časem, které loď stráví čekáním na uvolnění kanálu, ale jenom s časem průplavu samotného kanálu, který začíná vstupem lodi do jedné z komor.

3.2 Popis konceptu

Během vytváření modelu jsme na základě informací v kapitole 2 nejprve navrhli abstraktní model, reprezentovaný Petriho sítí, který je možné najít v příloze A.

Na okrajích modelu se nachází výše popisované komory pro průjezd lodí. Po příjezdu lodi do komory si loď zabírá kapacitu dané komory a začíná její přesun k jezeru. Pokud není dostupná kapacita, tak loď vyčkává před komorou. Následně loď proplouvá jezerem. Trvání průplavu je pro zjednodušení modelu určeno na 11 hodin. Po uplynutí se loď opět dostane ke komorám na druhém konci kanálu, zabere si jejich kapacitu, nebo vyčkává. Po průplavu komorou loď opouští systém.

4 Architektura simulačního modelu

Simulační model [7, str. 44] je rozdělený do několika funkcí, podle typu experimentu. Každý experiment obsahuje:

1. inicializací modelového času [7, str. 21]
2. spuštění generátorů lodí a poruch (dle typu experimentu)
3. zahájení simulace
4. výpis statistik

Proces lodě

Lodě jsou generovány třídou `PanamaxShipGenerator`, která je podtřídou `Event` [7, str. 169]. Nová loď je generována každou hodinu, a při generování je náhodně pomocí funkce `Random` [7, str. 167] určen směr, ze kterého loď ke kanálu připluje. Samotná loď je modelována třídou `PanamaxShip`, která obsahuje základní informace o lodi (např. směr plavby a kapacitu lodě) a je podtřídou třídy `Process` [7, str. 171]. Po připlutí se loď pokusí zabrat jednu z komor na příslušné straně, kterou by vstoupila do kanálu. Pokud se jí to povede, zaznamená se čas přístupu lodi do kanálu a loď pokračuje v plavbě. V opačném případě se loď zařadí do fronty ke komoře. Po dokončení plavby hlavní části kanálu se loď stejným způsobem zařadí do fronty pro odchod z kanálu. Po opuštění kanálu se zaznamenají statistiky do globálních proměnných o délce cesty a množství přeneseného nákladu.

Proces zablokování komory

Poruchy komor se generují pomocí třídy `LockAccidentGenerator` a oprava poruchy je realizována procesem `RepairLock`. Tento proces po jeho zahájení prioritně obsadí komoru, ve které došlo k poruše. V případě, že se loď nachází v komoře v čase poruchy je loď odstraněna ze systému (lze interpretovat tak, že je loď poškozena a nemá možnost pokračovat v plavbě). Po dokončení opravy komory, jejíž trvání lze nastavit pomocí globální proměnné, je možné komoru opět používat.

Maximální kapacita kanálu

Informaci, kterou jsme se doposud nezaobírali je maximální kapacita kanálu, která představuje maximální počet lodí najednou uvnitř kanálu. Na důležitost této informace jsme narazili až při modelování chyby jedné z komor. Při vzniku chyby se totiž může stát to, že lodě, které žádají o přístup do kanálu mají přednost před loděmi, které chtějí kanál opustit. To vede k nárůstu lodí v kanálu a tím i k prodlužování času stráveného v kanálu. Tato informace mimo jiné souvisí i s tím, že některé části průplavu nejsou dostatečně široké, aby umožňovaly plavbu neomezenému počtu plavidel najednou. Jelikož jsme nebyli schopni tuto informaci nikde najít, vycházeli jsme z běžného provozu kanálu, kde se táto kapacita pohybuje přibližně okolo 20 lodí najednou. Je patrně jasné, že tato informace má vliv na fungování kanálu při výskytu chyby v některé komoře.

4.1 Spouštění simulačního modelu

Simulační model je nejdříve potřeba přeložit pomocí příkazu `make`, pak je ho možné spustit příkazem `./panama [OPTIONS]`, kde `OPTIONS` představují parametry spuštění. Spuštění experimentu na ověření validity modelu je možné přepínačem `-v` nebo `make run`. Spuštění experimentů poškození komor je možné s přepínači `-e [1,2]`. Výsledky experimentů (statistiky jednotlivých částí průplavu) se nacházejí ve souboru `simulation.out`.

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Cílem simulačních experimentů je potvrdit validitu vytvořeného modelu a simulovat stav kanálu při poruše jedné nebo více komor. Simulace byly spuštěny jednou a představují období jednoho měsíce.

5.1 Experiment 1

Experiment č. 1 (tabulky 1 a 2), má za úkol ověřit validitu modelu. Používá hodnoty získané v kapitole 2 a představuje provoz kanálu za běžných podmínek.

Počet vygenerovaných lodí		Projelo přes průplav	Počet tun nákladu (mil.)
Atlantický oceán	Tichý oceán		
404	389	803	22,64

Tabulka 1: Statistiky počtu lodí za 1 měsíc

		Vytíženost komor			
		Atlantické	2	Tichomořské	2
Doba průplavu [h]	Obsazená kapacita kanálu	1	2	1	2
15,4	18,9	96%	92%	93%	94%

Tabulka 2: Statistiky jednotlivých částí průplavu

Z výsledků experimentu č. 1 vidíme, že se přibližují průměrnému počtu plaveb za jeden měsíc, že rozdělení lodí mezi atlantickým a tichomořským je rovnoměrné, čemu odpovídají zjištěná data [4]. Také vidíme, že počet tun nákladu odpovídá definici v sekci 2 a z tabulky 2, že průměrné obsazení komor kanálu se pohybuje nad 90%, co značí, že kanál je téměř plně využíván.

5.2 Experiment 2

V tomto experimentu se zabýváme scénářem, kdy dodje k odstavení jedné ze dvou komor u Atlantického oceánu. Doba odstavení je nastavena na 7 dní a vzniká tak omezená schopnost obsluhovat lodě.

Počet vygenerovaných lodí		Projelo přes průplav	Počet tun nákladu (mil.)
Atlantický oceán	Tichý oceán		
339	324	663	18,85

Tabulka 3: Statistiky počtu lodí za 1 měsíc

Doba průplavu [h]	Obsazená kapacita kanálu	Maximální doba průplavu [h]
16,13	19,4	26,25

Tabulka 4: Statistiky průplavů

Z výsledků experimentu jde vidět, že kvůli omezené funkčnosti se lehce zvýší doba průplavu lodí. Celkově v simulaci kanálem proplulo o 140 lodí méně.

5.3 Experiment 3

Cílem tohoto experimentu je představit možný scénář, kdy dojde k poruše obou komor ze strany Atlantického oceánu a tím se kanál dočasně ucpe. Doba odstranění závady opět zabere v tomto případě 7 dní, a tak se některým lodím výrazně prodlouží zkoumaná doba potřebná na průplav kanálem.

Počet vygenerovaných lodí		Projelo přes průplav	Počet tun nákladu (mil.)
Atlantický oceán	Tichý oceán		
243	237	480	13,72

Tabulka 5: Statistiky počtu lodí za 1 měsíc

Doba průplavu [h]	Obsazená kapacita kanálu	Maximální doba průplavu [h]
22,22	19,67	180

Tabulka 6: Statistiky průplavů

Dle očekávání je v tabulkách 5 a 6 vidět velký pokles lodí, které kanálem propluly a výrazné prodloužení času stráveného v průplavu u některých z nich. Při tomto experimentu zůstalo v kanále celkem 18 lodí. U všech z nich se doba průplavu zvýšila na 147 hodin až 180 hodin. Po dobu jednoho týdne pak nemohly nové příchozí lodě využít průplavu a musely čekat před ním. Celkově v simulaci projelo o 323 lodí méně než při 5.1 a převezlo se tak o 8,92 mil. tun méně nákladu.

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

V simulačních experimentech nad navrženým modelem Panamského průplavu jsou vidět dopady možných poruch přečerpávacích komor na propustnost kanálu. Simulačně byly provedeny sedmidenní výpadky jedné nebo dokonce obou komor u Atlantického oceánu. Z výsledků simulací vyplývá, že tyto potíže mají výrazný dopad na ekonomiku průplavu, vedou na dlouhé čekání lodí, což vede k pozdnímu dodání zboží do cílové destinace a ovlivňuje tak celosvětovou ekonomiku.

Experimenty tak poukazují na důležitost častých kontrol všech zařízení a včasné odchytení závad, než k dojde ke dlouhodobému poškození funkčnosti.

Literatura

- [1] Neopanamax Traffic Through the Panama Canal by Month. [online], 2022.
URL <https://pancanal.com/wp-content/uploads/2022/10/Table13.pdf>
- [2] Oceangoing Commercial Traffic Through the Panama Canal by Month. [online], 2022.
URL <https://pancanal.com/wp-content/uploads/2022/10/Table02.pdf>
- [3] Panama Canal - Transit Procedures. [online], 5. července 2011, [vid. 2011-07-05].
URL <https://www.globalsecurity.org/military/facility/panama-canal-transit.htm>
- [4] Panama Canal Statistics. [online], duben 2022.
URL <https://lethagencies.com/uploads/statistics/panama/Panama%20Canal%20Statistics%20April%202022.pdf>
- [5] Hrubý, M.: Diskrétní modelování – Petriho sítě a SIMLIB/C++. [online], 2022.
URL <http://perchta.fit.vutbr.cz/vyuka-ims/uploads/1/ims-demo1.pdf>
- [6] Panama Canal Authority: Regular Booking Slots Availability. 2022, [Online; vid. 4-12-2022].
URL <https://bookingwp.panama-canal.com/#>
- [7] Peringer, P.; Hrubý, M.: Modelování a simulace, Text k přednáškám kursu Modelování a simulace na FIT VUT v Brně. [online], 25. září 2022, [vid. 2022-09-15].
URL <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>
- [8] Peringer, P.; Leska, D.; Martinek, D.: SIMLIB/C++ (SIMulation LIBrary for C++). [online], 1. listopadu 2022, [vid. 2022-11-01].
URL <http://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB>
- [9] Wikipedia contributors: Panama Canal — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2022, [Online; vid. 2-December-2022].
URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Panama_Canal&oldid=1125062623
- [10] Wikipedia contributors: Panama Canal expansion project — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2022, [Online; vid. 4-12-2022].
URL https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Panama_Canal_expansion_project&oldid=1125552096
- [11] Wikipedia contributors: Panamax — Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2022, [Online; accessed 4-12-2022].
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Panamax>

Přílohy

A Petriho síť

