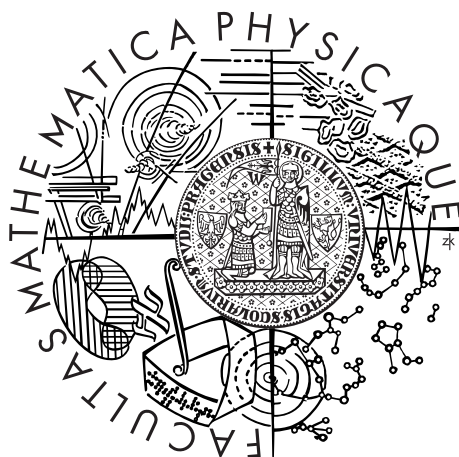


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁRSKA PRÁCA



Tomáš Novella

Grid-Based Path Planning

Katedra teoretické informatiky a matematické logiky

Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Tomáš Balyo

Študijný program: Informatika

Študijný obor: Obecná informatika

Praha 2013

Pod'akovanie.

Prehlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne a výhradne s použitím citovaných prameňov, literatúry a ďalších odborných zdrojov.

Beriem na vedomie, že sa na moju prácu vzťahujú práva a povinnosti vyplývajúce zo zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona a v platnom znení, obzvlášť skutočnosť, že Univerzita Karlova v Prahe má právo na uzavretie licenčnej zmluvy o použití tejto práce ako školského diela podľa §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Název práce: Grid-Based Path Planning

Autor: Tomáš Novella

Katedra: Název katedry či ústavu, kde byla práce oficiálně zadána

Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Tomáš Balyo, Katedra teoretické informatiky a matematické logiky

Abstrakt:

Klíčové slová:

Title: Grid-Based Path Planning

Author: Tomáš Novella

Department: Department of Theoretical Computer Science and Mathematical Logic

Supervisor: Mgr. Tomáš Balyo, Department of Theoretical Computer Science and Mathematical Logic

Abstract:

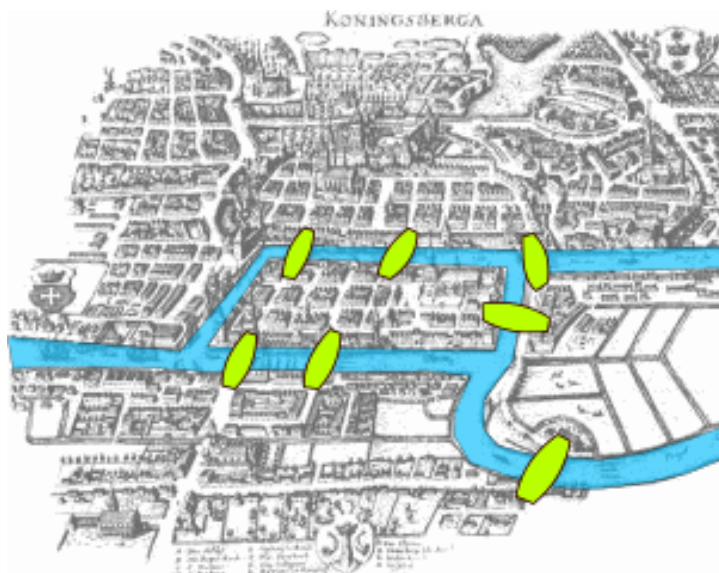
Keywords:

Obsah

Úvod	6
1 Zadanie problému a cieľové požiadavky	8
1.1 Úvodné definície a značenia	8
1.2 Mriežkový graf	9
1.3 GPPC: Grid-Based Path Planning Competition	10
1.3.1 Špecifiká súťaže, limity	10
1.3.2 Kritériá súťaže, hodnotenie programov	10
2 Prehľad algoritmov	11
2.1 Dijkstrov algoritmus	11
2.1.1 Zložitosť	11
2.2 Lineárny Dijkstrov algoritmus	13
2.3 A*	13
3 Nový algoritmus: NovellA*	16
3.1 Zlepšenie výkonu v niektorých prípadoch	16
3.2 Hľadáme obdlžniky	17
3.2.1 Proporcie obdlžnikov	17
3.2.2 Nájdenie najväčšej jednotkovej podmatice	18
4 Porovnanie algoritmu NovellA* s ostatnými algoritmami.	19
4.1 Vstupné dáta	19
5 T-maps - Vizuálna predstava	20
5.1 Použitie	20
5.1.1 Ukážka L ^A T _E Xu	21
Záver	22
Zoznam použitej literatúry	23
Seznam tabulek	24
Zoznam použitých skratiek	25
Prílohy	26

Úvod

Slávna Eulerova úloha siedmych mostov v Kaliningrade [1] sa považuje za prvú prácu, ktorá zaviedla teóriu grafov. Úlohou je prejsť po týchto siedmych mostoch tak, aby sme po každom šli práve raz.



Obr. 1: Sedem mostov v Kaliningrade

Od tej doby sa využitie teórie grafov značne rozšírilo a v dnešnej dobe patrí medzi významné a rozpracované teórie. V modernej dobe je jedným z jej najdôležitejších problémov hľadanie najkratšej cesty. Najčastejšie sa s nimi stretávame pri plánovaní trasy v GPS navigácii. Medzi najvýznamnejšie práce považujeme práce od Dijkstru [2] a Floyd-Warshalla.

S narastajúcim fenoménom počítačových hier a umelej inteligencie sa do povedomia dostal špeciálny typ grafu – mriežkový graf, využívaný ako herná mapa. V hrách často trebalo nájsť cestu pre počítačom ovládanú postavku z miesta A do miesta B. Nakoľko je väčšina hier komerčná, algoritmy využívané v hrách boli a sú taktiež komerčné. Dôsledkom toho nie sú verejne publikované a porovnané rôzne prístupy a algoritmy na vyhľadávanie najkratších ciest v mriežkových mapách. A keď už aj sú, tak práce používajú rôzne mapy na bechmarking a teda neexistuje žiadna globálna porovnávacia štúdia týchto prístupov.

Súťaž *Grid-Based Path Planning Competition* [4] sa snaží tento problém vyriešiť tým, že porovnáva rôzne algoritmy na veľkej množine máp použitých v známych počítačových hrách a vyhodnocuje ich úspešnosť v rámci viacerých kategórií.

Cieľom tejto práce je spraviť prehľad doterajších prístupov k tomuto problému a prispieť vlastným algoritmom do súťaže a niekoľkými vylepšeniami k doterajším prístupom hľadania najkratšej cesty na mriežkových grafoch.

V prvej kapitole si zavedieme kľúčové termíny a popíšeme problém formálne. Na konci kapitoly spomenieme súťaž, ktorej sa daný algoritmus zúčastnil.

Druhá kapitola je zameraná na vytvorenie prehľadu kľúčových algoritmov používaných na riešenie problému.

V tretej kapitole navrhujeme vlastné riešenie založené na poznatkoch popísaných v druhej kapitole s pridaním vlastných vylepšení.

Vo štvrtej kapitole toto riešenie porovnáme s dosavadnými.

1. Zadanie problému a cieľové požiadavky

1.1 Úvodné definície a značenia

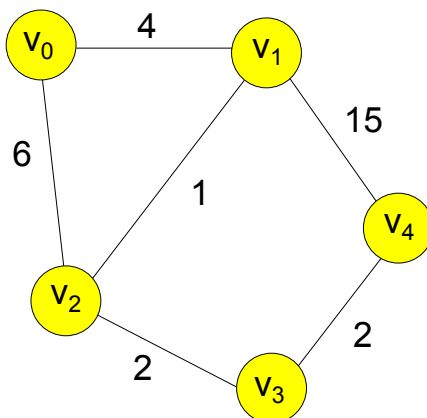
Na začiatok si zavedieme niektoré dôležité pojmy z teórie grafov. Úlohu so všetkými jej špecifikami si ozrejníme v nasledujúcich podkapitolách.

Definícia. Graf G je usporiadaná dvojica (V, E) , kde V označuje množinu vrcholov(vertices) a $E \subseteq V \times V$ označuje množinu hrán(edges). Značíme $G = (V, E)$.

Poznámka 1. Hrana je jednoznačne určená dvojicou vrcholov.

Definícia. Ohodnotený graf (G, w) je graf s spolu s reálnou funkciou (tzv. ohodnotením) $w : E(G) \rightarrow \mathbb{R}$, kde w je funkcia, ktorá každej hrane priradí reálne číslo takzvanú dĺžku, alebo hodnotuhrany.

Ukážka obecného ohodnoteného grafu je na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Ohodnotený graf

Pri hľadaní najkratšej cesty v grafe pracujeme s pojmy, ako sú *cesta* a *najkratšia cesta*.

Definícia. Cesta P z vrcholu v_0 do vrcholu v_n v grafe G je postupnosť $P = (v_0, e_1, v_1, \dots, e_n, v_n)$, pre ktorú platí $e_i = \{v_{i-1}, v_i\}$ a taktiež $v_i \neq v_j$ pre každé $i \neq j$.

Všimnime si, že na ceste nenavštívime žiaden vrchol dvakrát a teda cesta neobsahuje kružnice.

Definícia. Dĺžka cesty P z vrcholu v_0 do vrcholu v_n v ohodnotenom grafe (G, w) je súčet dĺžok hrán, ktoré sa na ceste nachádzajú.

Samozrejme, medzi dvoma vrcholmi môže existovať viacero ciest.

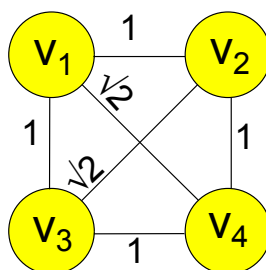
Definícia. Najkratšia cesta P z vrcholu v_0 do vrcholu v_n v ohodnotenom grafe (G, w) je cesta z vrcholu v_0 do vrcholu v_n s najmenšou vzdialenosťou.

1.2 Mriežkový graf

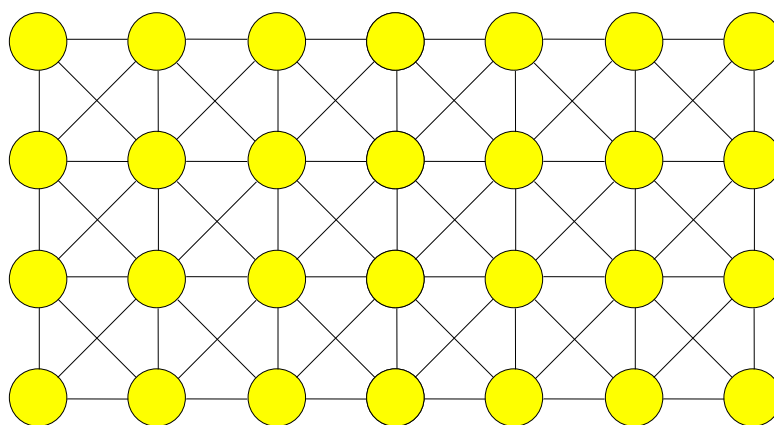
Keď sme si už zaviedli kľúčové pojmy, prejdime k samotnému zadaniu úlohy. Ako sme už spomínali, problém budeme riešiť na tzv. mriežkových grafoch. Čo je mriežkový graf a v čom sa od obecného grafu odlišuje?

Zjednodušene povedané, je to mapa s ktorou sa stretávame v najrôznejších hrách, ako je Warcraft, Startcraft, Dragon Age a podobne. ASK?? je to "ma-pa" dat do uvozoviek

Ide o špeciálny a dosť obmedzený typ grafu. Vizualne si ho môžeme predstaviť ako konečný graf v ktorom sú vrcholy rozostúpené v tvare mriežky a hrana je stále medzi dvojicami susedných vrcholov vo všetkých ôsmych smeroch. Dĺžka vodorovnej alebo zvislej hrany je 1 a dĺžka šikmej hrany je $\sqrt{2}$.



Obr. 1.2: Mriežkový graf 2x2



Obr. 1.3: Mriežkový graf bez označenia vrcholov a dĺžok hrán

Zadefinujme si teraz mriežkový graf formálne.

Definícia. Mriežkový graf rozmerov $m \times n$ je ohodnotený graf s ohodnotením w s $m \cdot n$ vrcholmi očíslovanými od $v_{1,1}$ až po $v_{m,n}$ s priamymi hranami j v tvare $\{v_{a,b}, v_{a,b+1}\}, \{v_{a,b}, v_{a+1,b}\}$, kde $w(j) = 1$ a šikmými hranami s v tvare $\{v_{a,b}, v_{a+1,b+1}\}, \{v_{a,b}, v_{a-1,b+1}\}$, kde $w(s) = \sqrt{2}$.

Poznámka 2. Mriežkový graf sa dá reprezentovať ako matica $m \times n$ nad telesom \mathbb{Z}_2 , kde jednotky predstavujú vrcholy. Príklad maticovej reprezentácie grafu rozmerov 4×6 je na obrázku 1.4.

Obr. 1.4: Maticová reprezentácia mriežkového grafu

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.3 GPPC: Grid-Based Path Planning Competition

Algoritmus navrhnutý a naprogramovaný v tejto práci bol zaradený do súťaže **GPPC**, ktorá sa koná približne 2 krát ročne.

1.3.1 Špecifiká súťaže, limity

Mriežkové grafy budú mať rozmery maximálne 2048×2048 . Súťaž bude rozdelená do dvoch fáz — fázy predspracovania grafu (pre-processing) a fázy testovania. Na predspracovanie grafu bude vyhradený čas maximálne 30 minút a program si svoje dáta uloží na disk do súboru o veľkosti maximálne 50MB. Potom vo fáze testovania budú dostávať požiadavky na nájdenie najkratšej cesty.

Úlohou súťaže je naimplementovať tieto tri funkcie.

```
1 void PreprocessMap(std::vector<bool> &bits, int width, int height,
2   const char *filename);
3 void *PrepareForSearch(std::vector<bool> &bits, int width, int
4   height, const char *filename);
5 bool GetPath(void *data, xyLoc s, xyLoc g, std::vector &path);
```

1.3.2 Kritériá súťaže, hodnotenie programov

Na algoritmus môžeme kladť rôzne požiadavky, ktoré si častokrát navzájom protirečia, preto programy posudzujeme podľa viacerých kritérií.

- Celkový čas na nájdenie cesty.
- Čas na nájdenie prvých 20 tich krokov.
- Dĺžka cesty (zohľadnená suboptimalita).
- Maximálny čas vrátenia hociktorej časti cesty.

Testovací počítač má 12 GB RAM pamäti a dva 2.4 Ghz Intel Xeon E5620 procesory.

2. Prehľad algoritmov

Na hľadanie najkratších ciest v grafe poznáme mnoho algoritmov, ktoré vieme rozdeliť do troch skupín.

- Point To Point Shortest Path(P2PSP) - hľadajú najkratšiu cestu medzi dvoma zadanými bodmi
- Single Source Shortest Path(SSSP) - pre daný vrchol v hľadajú najkratšiu cestu do všetkých vrcholov grafu.
- All Pairs Shortest Path (APSP)- skúmajú najkratšiu cestu medzi všetkými dvojicami vrcholov.

Tieto problémy sú na obecných grafoch NP-ťažké. Napriek tomu na mriežkových grafoch (kde sú vzdialenosti medzi vrcholmi vždy kladné) existujú riešenie v polynomiálnom čase.

V práci sa budeme ďalej zaoberať riešením prvého problému (Point to Point Shortest Path).

V tejto kapitole si popíšeme algoritmy, ktoré sú použiteľné na všetkých grafoch s nezápornými dĺžkami hrán.

TODO?? POTIAL VSETKO PREPISANE a myslim, ze clekom prijemne citatelne.

2.1 Dijkstrov algoritmus

Medzi základné algoritmy typu SSSP patrí Dijkstrov algoritmus 1 popísaný už v roku 1959. Patrí medzi relaxačné algoritmy a jeho činnosť si vieme predstaviť ako posúvanie vlny po grafe TODO??WTf did I just write?

Pri hľadaní cesty z vrcholu s do vrcholu t prechádzame postupne vrcholy zo stúpajúcou vzdialenosťou od s , až dokým sa nedostaneme k cieľovému vrcholu t . Vizualne si beh algoritmu môžeme predstaviť ako kruh so stredom v bode s so zväčšujúcim sa polomerom.

Algoritmus je nasledovný 1. ?? rozlisujeme tri stavy vrcholov, co je halda blablabla ASK??ako odkazovat?

FIXME ?? kolize H a h()

Veta 1. *V dijkstrovom algoritme uzatvárame každý dosiahnuteľný vrchol práve raz.*

ASK?? citovat dijkstru a maresa ako dokaz?

2.1.1 Zložitosť

popis len obecné pomocou času na ExtractMin a Insert.

Algoritmus 1 Dijkstra: nájdí najkratšiu cestu medzi dvoma bodmi s a t

Vstup: graf G

Výstup: hodnotiacia funkcia h obsahujúca najkratšie cesty z vrcholu s do vrcholov grafu

```
1:  $h(*) \leftarrow \infty$ 
2:  $stav(*) \leftarrow \text{NENAVŠTÍVENÝ}$ 
   {pridám počiatok}
3:  $h(s) \leftarrow 0$ 
4:  $stav(s) \leftarrow \text{OTVORENÝ}$ 
5: Heap  $H$ 
6:  $Insert(H, s)$ 
7: while  $H$  not empty do
8:   // vyberiem  $v$  – najbližší otvorený vrchol
9:    $v \leftarrow ExtractMin(H)$ 
10:  while  $stav(v) \neq \text{OTVORENÝ}$  do
11:     $v \leftarrow ExtractMin(H)$ 
12:  end while
13:  // zrelaxujeme vrchol  $v$ 
14:  for all  $e, e = (v, u)$  do
15:    if  $h(u) > h(v) + l(v, u)$  then
16:       $Insert(H, v)$ 
17:       $stav(u) \leftarrow \text{OTVORENÝ}$ 
18:       $h(u) \leftarrow h(v) + l(v, u)$ 
19:    end if
20:  end for
21: end while
```

2.2 Lineárny Dijkstrov algoritmus

Zložitosť vyššiepopísaného algoritmu 1 závisí od haldy, ktorú použijeme. Pri použití binárnej haldy bude $O(\text{blablabla})$. TODO??

Nakoľko pre mriežkový graf platia??

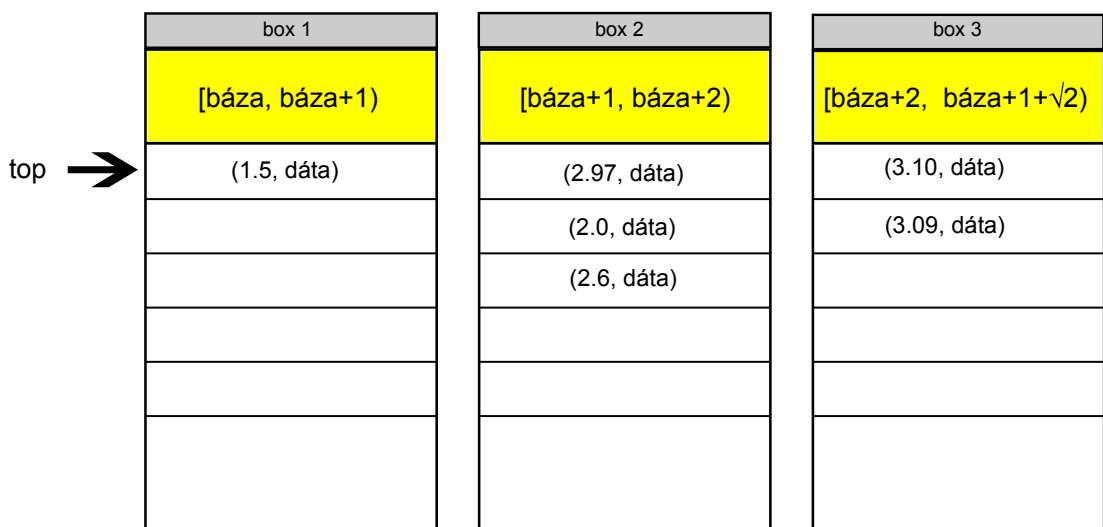
Veta 2. *Pokiaľ sme v Dijkstrovom algoritme uzavreli vrchol u so vzdialenosťou d_u a najkratšia hrana v grafe má dĺžku ϵ , tak môžeme taktiež uzavrieť všetky vrcholy v so vzdialenosťami $d_v \in (d, d + \epsilon)$.*

Dôkaz. Do haldy vieme pridávať len vrcholy so vzdialenosťami aspoň $d + \epsilon$ (kratšia hrana tam už nie je), ale tie už cestu k vrcholom so vzdialenosťami $d_v \in (d, d + \epsilon)$ skrátiť nemôžu. \square

Keďže veľkosť najkratšej hrany $\epsilon = 1$, tak v štruktúre budeme mať priehradky, ktorých rozsah je ostro menší ako ϵ . Na konštrukciu lineárneho Dijkstrovho algoritmu potrebujeme priehradkovú haldu. Tá vie vybrať „jeden z najmenších“ prvkov. v konštantnom čase a rovnako ako aj vložiť prvok.

báza = 1

1. priehradka = box 1
2. priehradka = box 2
3. priehradka = box 3



Obr. 2.1: Priehradky

blablabla

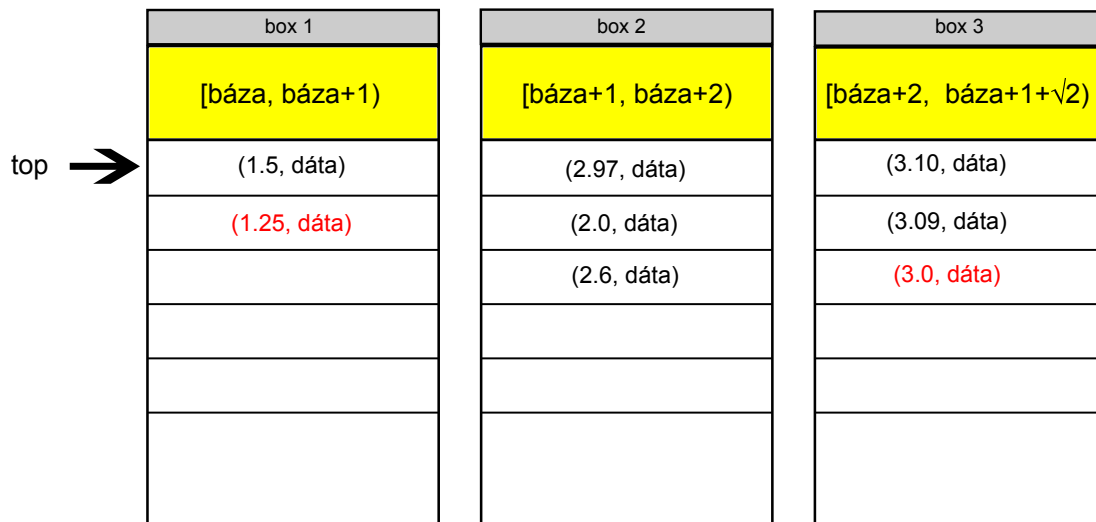
2.3 A*

dalsi algoritmus do zbierky je a* [3].

báza = 1

1. priehradka = box 1
2. priehradka = box 2
3. priehradka = box 3

element1 = (3.0, dáta)
element2 = (1.25, dáta)
insert (element1)
insert (element2)

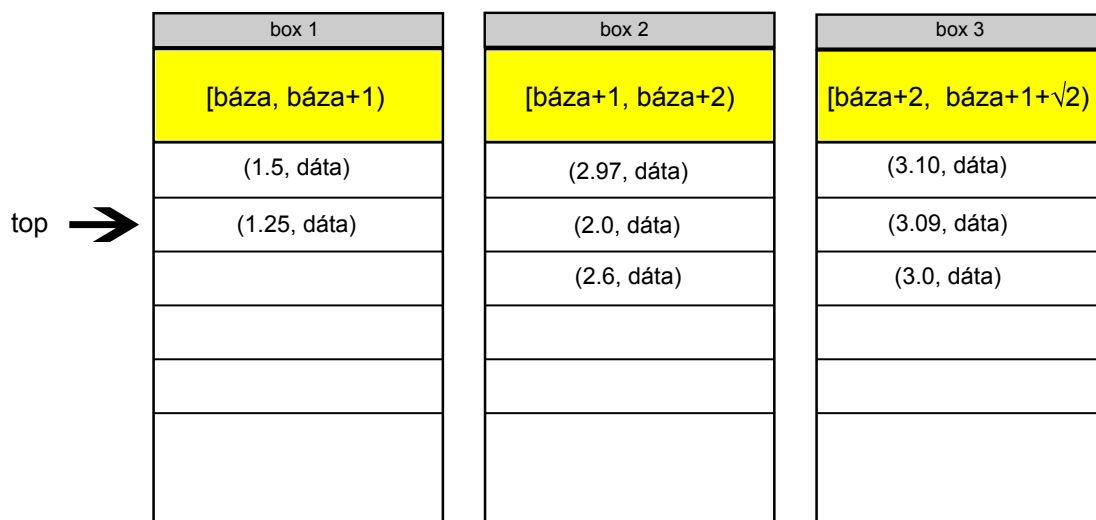


Obr. 2.2: Insert

báza = 1

1. priehradka = box 1
2. priehradka = box 2
3. priehradka = box 3

pop()



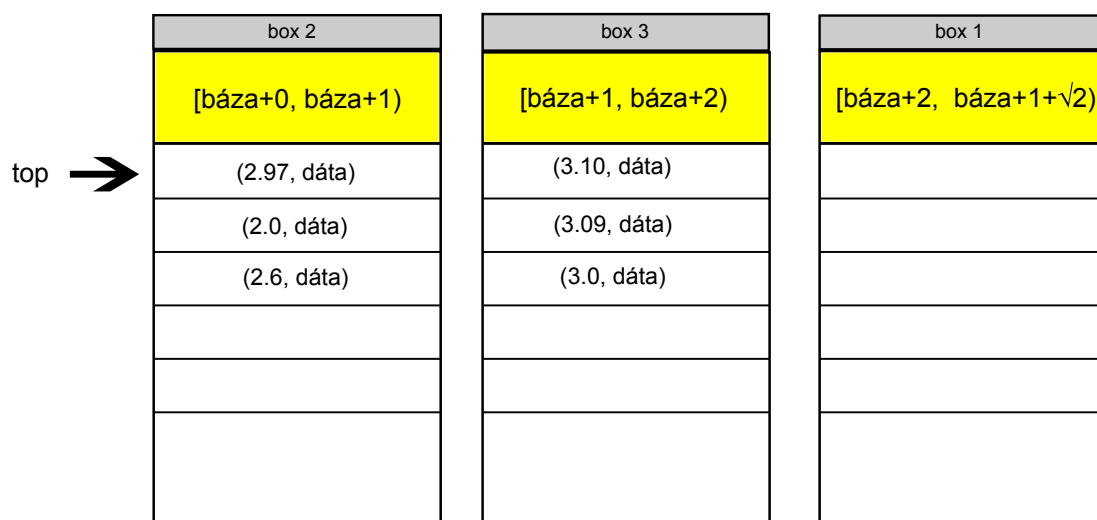
Obr. 2.3: Insert

báza = 2 (báza + 1) pop()

1. priehradka = box 2

2. priehradka = box 3

3. priehradka = box 1



Obr. 2.4: Insert

3. Nový algoritmus: Novella*

3.1 Zlepšenie výkonu v niektorých prípadoch

Nie všetky najkratšie cesty ale musia obchádzať veľa prekážok. V mnohých prípadoch nemusí medzi počiatočným a koncovým bodom ležať žiadna prekážka, a teda cesty sú veľmi priamočiare. To sa pokúsime využiť na zlepšenie výkonu algoritmu.

Pre ľahšie vyjadrovanie si zavedme definíciu *mriežkového grafu bez prekážok*.

Definícia. Mriežkový graf je bez prekážok pokiaľ medzi každými dvoma susednými vrcholmi existuje hrana.

Kvôli lepšej prehľadnosti budeme mriežkový graf bez prekážok nazývať aj *obdĺžnik*. Intuitívne, kvôli jeho vizuálnej interpretácii.

Majme mriežkový graf bez prekážok a hľadáme najkratšiu cestu medzi bodmi $s = (x_s, y_s), t = (x_t, y_t)$. V tomto prípade vieme nájsť najkratšiu cestu veľmi jednoducho.

Algoritmus 2 Nájsť najkratšiu cestu medzi dvoma bodmi s a t na mriežkovom grafe bez prekážok

Vstup: $s = (x_s, y_s), t = (x_t, y_t)$

Výstup: *path*

```
1: path.append((x_s, y_s)) {pridám počiatok}
2: while  $x_s \neq x_t \vee y_s \neq y_t$  do
3:   if  $x_s < x_t$  then
4:      $x_s \leftarrow x_s + 1$ 
5:   else if  $x_s > x_t$  then
6:      $x_s \leftarrow x_s - 1$ 
7:   end if
8:   if  $y_s < y_t$  then
9:      $y_s \leftarrow y_s + 1$ 
10:  else if  $y_s > y_t$  then
11:     $y_s \leftarrow y_s - 1$ 
12:  end if
13:  path.append((x_s, y_s))
14: end while
```

Teda, jednoducho povedané: keď sa počiatočný a koncový bod líšia v jednej súradnici, tak sa posúvame priamočiario, keď sa líšia v oboch, tak sa posúvame šikmo.

Pokiaľ si zadefinujeme $dx := |x_t - x_s|$ a $dy := |y_t - y_s|$, tak počet vrcholov, ktorými cesta prechádza vieme zhora odhadnúť, ako $\max(dx, dy)$. Jej vzdialenosť vieme zistiť v čase $O(\max(dx, dy))$. Na zistenie vzdialenosti v každom kroku nám stačí konštantná pamäť.

TODO?? Poznámka, že nepotrebujem na to obdĺžniky, môžem robiť aj komplikovanejšie tvary, ale by to sa blbo hľadalo... ležaze...

Skúsme to teda nejak využiť. Pokiaľ vieme, že počiatočný aj koncový bod ležia v jednom obdĺžniku, tak máme problém vyriešený. Jediným problémom ostalo takéto obdĺžniky nájsť.

3.2 Hľadáme obdĺžniky

3.2.1 Proporcie obdĺžnikov

Dôležitou otázkou je, na akých vlastnostiach obdĺžnikov záleží. Uvažujme nasledujúci motivačný príklad.

Príklad 1. *Majme na mape nájdené dva obdĺžniky, ktorých celkový obsah je 10. Predstavme si tieto dva prípady. V prvom prípade je obsah prvého 9 a druhého 1, v druhom prípade sú obsahy 6 a 4. Chceme maximalizovať pravdepodobnosť toho, aby pri voľbe dvoch náhodných bodov boli obe v rovnakom obdĺžniku.*

Úlohu vieme zobecniť na klasickú pravdepodobnostno-optimalizačnú úlohu.

Príklad 2. *Majme k ekvivalenčných tried na množine s n prvkami. Ako zvoliť ekvivalenčné triedy tak, aby pri voľbe dvoch náhodných prvkov bola pravdepodobnosť toho, že oba prvky budú v tej istej ekvivalenčnej triede čo najvyššia?*

Poznámka 3. *Ekvivalenčnú triedu predstavuje obdĺžnik a množinu predstavuje množina vrcholov grafu. Alternatívne sa môžeme na úlohu pozeráť ako na problém farbenia guľčiek čo najmenším počtom farieb.*

Zapíšme túto úlohu formálne.

Majme n -prvkovú množinu $Prv = \{x_1, \dots, x_n\}$, k -prvkovú množinu ekvivalenčných tried $Ek = \{ek_1, \dots, ek_k\}$, veľkosť triedy ek_i označme k_i a zavedme funkciu $f: Prv \rightarrow Ek$ ktorá roztriedi prvky do ekvivalenčných tried.

Označme výberový priestor $\Omega = \{(x_a, x_b) | x_a, x_b \in Prv, a \neq b\}$ Udalosťou A_i nazveme jav, v ktorom oba prvky patria do tej istej ekvivalenčnej triedy ek_i , teda $A_i = \{(x_a, x_b) | x_a, x_b \in Prv, a \neq b, f(x_a) = f(x_b) = ek_i\}$ Jav $A = \bigcup_{i=1}^k A_i$ teda nastáva práve vtedy, keď oba vybrané prvky patria do rovnakej triedy.

Úlohou je teda navrhnúť funkciu f tak, aby pravdepodobnosť $P[A]$ bola čo najvyššia. Keďže udalosti A_i sú nezlučiteľné, môžeme písať $P[A] = P[\bigcup_{i \in Ek} A_i] = \sum_{i \in Ek} P[A_i]$.

Ak si pravdepodobnosť každého javu rozpíšeme, dostaneme $\sum_{i \in Ek} P[A_i] = \sum_{i=1}^k \frac{\binom{k_i}{2}}{\binom{|Prv|}{2}}$.

nakolko chceme nejak rozvrhnúť prvky v triedach ek_i , a menovateľ je len konštanta, môžeme ho vynechať.

Maximalizujeme teda hodnotu výrazu $\sum_{i=1}^k \binom{k_i}{2} = \sum_{i=1}^k \frac{k_i!}{(k_i-2)!2!} = \sum_{i=1}^k \frac{k_i(k_i-1)}{2}$. Po vyškrtnutí konštanty a roznásobením sme dostali nasledujúcu optimalizačnú úlohu: maximalizovať $\sum_{i=1}^k k_i^2 - k_i$ za podmienok $\sum_{k=1}^k k_i = n$, kde $k_i \in \mathbb{N}_0$.

Sumu si vieme rozpísať ako $\sum_{i=1}^k k_i^2 - k_i = \sum_{i=1}^k k_i^2 + \sum_{i=1}^k -k_i$ druhá suma sa nasčíta $-n$, čo je konštanta, takže nám stačí maximalizovať $\sum_{i=1}^k k_i^2$.

Teraz nám už len zostáva použiť nerovnosť $(a+b)^2 \geq a^2 + b^2$ ktorá platí pre $a, b \geq 0$, z ktorej jasne vyplýva, že potrebujeme spraviť ľubovoľné k_i čo najväčšie. Ekvivalenčné triedy musia teda byť čo najväčšie a problém sa transformuje na problém hľadania obdĺžnikov s najväčším možným obsahom. V programe tento problém rieši trieda Colorizator.

3.2.2 Nájdenie najväčšej jednotkovej podmatice

Ako sme si v úvode povedali, mriežkovú mapu vieme reprezentovať ako maticu a teda problém môžeme ekvivalentne zapísať ako problém hľadania najväčšej jednotkovej podmatice. Tento problém má riešenie v čase lineárnom od počtu vrcholov a teda nájdenie k najväčších jednotkových matíc trvá $O(k * n)$, kde n je počet vrcholov matice.

Slovný popis algoritmu 3: V prvom prechode maticou si u každého vrcholu zapamätáme počet jedničiek naľavo od neho, vrátane daného vrcholu. Tento prechod trvá lineárny čas.

V druhom prechode treba prejsť zaradom všetky stĺpce zľava doprava

Algoritmus 3 Nájdenie najväčšej jednotkovej podmatice v matici $m \times n$

Vstup: matica M rozmerov $m \times n$ nad telesom \mathbb{Z}_2

Výstup: pravý dolný roh podmatice aj s jej rozmermi

```
1: for all prvok  $p, p \in M$  do
2:   if  $p = 0$  then
3:      $\text{nalavoOdPrvku}(p) \leftarrow 0$ 
4:   else
5:      $\text{nalavoOdPrvku}(p) \leftarrow$  najdlhšia súvislá postupnosť jednotiek končiaca
       prvkom  $p$ 
6:   end if
7: end for
8: for stĺpec  $s, s \in M$  do
9:   Vytvor nový zásobník dvojíc (riadok,  $\text{nalavoOdPrvku}$ )
10:  for riadok  $r, r \in M$  do
11:     $p \leftarrow (s, r)$ 
12:    while Zásobník je neprázdny do
13:      vyberiem prvok  $top$  z vrcholu zásobníka
14:      if  $top.r . \text{nalavoOdPrvku} > \text{nalavoOdPrvku}(p)$  then
15:         $\text{prvokZoZasobnika} \leftarrow (top.r, s)$ 
16:         $\text{DlzskaSekvencie}(\text{prvokZoZasobnika}) = r - \text{prvokZoZasobnika}.r$ 
17:      else
18:        Vložím prvok  $\text{prvokZoZasobnika}$  do zásobníka
19:        break
20:      end if
21:    end while
22:    Do zásobníka vložím dvojicu  $(r, \text{nalavoOdPrvku}(p))$ 
23:  end for
24:  while Zásobník je neprázdny do
25:    vyberiem prvok  $top$  z vrcholu zásobníka
26:     $\text{prvokZoZasobnika} \leftarrow (top.r, s)$ 
27:     $\text{DlzskaSekvencie}(\text{prvokZoZasobnika}) = m - \text{prvokZoZasobnika}.r$ 
28:  end while
29: end for
```

4. Porovnanie algoritmu NovellA* s ostatnými algoritmami.

4.1 Vstupné dáta

Častým problémom pri vzájomnom porovnávaní algoritmov je nájsť testovaciu vyorku, ktor... [5]

Na porovnávanie využijeme benchmark

TODO?? bibliografia styl - priezvisko,meno - alebo naopak???

5. T-maps - Vizuálna predstava

Pre názornejšiu predstavu behu algoritmu sme navrhli softvér **T-maps**, ktorý beh algoritmov ilustruje graficky.

5.1 Použitie

Program T-maps má funkčnosť veľmi podobnú programu Goole Maps. Na začiatku do neho nahrajeme mapu, nad ktorou algoritmus beží a taktiež dáta tohto algoritmu (prehľadané vrcholy a najkratšiu cestu) a program tieto hodnoty graficky znázorní. Medzi možnosti programu patrí export mapy a viditeľného poľa do súboru. TODO?? uzivatelska dokumentacia Možno popis zaujimavej casti



Obr. 5.1: Logo MFF UK

5.1.1 Ukázka \LaTeX u

V této krátké části ukážeme použití několika základních konstrukcí \LaTeX u, které by se vám mohly při psaní práce hodit.

Třeba odrážky:

- Logo Matfyzu vidíme na obrázku. 5.1
- Tato subsekce má číslo 5.1.1.
- Odkaz na literaturu [6].

Druhy pomlček: červeno-černý (krátká), strana 16–22 (střední), 45 – 44 (minus), a toto je — jak se asi dalo čekat — vložená věta ohraničená dlouhými pomlčkami. (Všimněte si, že jsme za `a` napsali vlnovku místo mezery: to aby se tam nemohl rozdělit řádek.)

„České uvozovky.“

Definícia. *Strom je souvislý graf bez kružnic.*

Veta 3. *Tato věta neplatí.*

Dôkaz. Neplatné věty nemají důkaz. □

[LGS12]

Závěr

Zoznam použitej literatúry

- [1] L. Euler. *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*. Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae, 8:128–140, 1741.
- [2] E. W. Dijkstra. *A note on two problems in connexion with graphs*. Numerische Mathematik, 1(1):269–271, 1959.
- [3] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, and Bertram Raphael. Correction to a formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *SIGART Bull.*, (37):28–29, December 1972.
- [4] N. Sturtevant. *GPPC: Grid-Based Path Planning Competition*. Dostupné z: [http://http://movingai.com/GPPC/](http://movingai.com/GPPC/)
- [5] N. Sturtevant. Benchmarks for grid-based pathfinding. *Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 4(2):144 – 148, 2012.
- [6] LAMPORT, Leslie. *ΛT_EX: A Document Preparation System*. 2. vydání. Massachusetts: Addison Wesley, 1994. ISBN 0-201-52983-1.
- [Sh97] Shor, Peter W. *Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer*. SIAM J. on Computing, 1997. Pages 1484–1509.
- [LGS12] Landais, Gregory, and Sendrier. *CFS Software Implementation*. Cryptology ePrint Archive, Report 2012/132, 2012.

Seznam tabulek

Zoznam použitých skratiek

Prílohy