



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tomáš Karella

Evoluční algoritmy pro řízení heterogenních robotických swarmů

Katedra teoretické informatiky a matematické logiky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Martin Pilát, Ph.D.

Studijní program: Informatika

Studijní obor: Programování a Softwarové Systémy

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Poděkování.

Název práce: Evoluční algoritmy pro řízení heterogenních robotických swarmů

Autor: Tomáš Karella

Katedra: Katedra teoretické informatiky a matematické logiky

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Martin Pilát, Ph.D., katedra

Abstrakt: Abstrakt.

Klíčová slova: klíčová slova

Title: Evolutionary Algorithms for the Control of Heterogeneous Robotic Swarms

Author: Tomáš Karella

Department: Department of Theoretical Computer Science and Mathematical Logic at Faculty of Mathematics and Physics

Supervisor: Mgr. Martin Pilát, Ph.D., department

Abstract: Abstract.

Keywords: key words

Obsah

Úvod	2
1 Evoluční algoritmy	3
1.1 Historie	3
1.2 Co je evoluční algoritmus?	3
1.2.1 Jedinec	4
1.2.2 Populace	4
1.2.3 Generace	4
1.2.4 Fitness	4
1.2.5 Kritérium ukončení	4
1.2.6 Základ EA	4
2 Odkazy na literaturu	6
2.1 Několik ukázek	6
3 Tabulky, obrázky, programy	7
3.1 Tabulky	7
3.2 Obrázky	8
3.3 Programy	8
4 Formát PDF/A	13
Závěr	14
Seznam použité literatury	15
Seznam obrázků	16
Seznam tabulek	17
Seznam použitých zkratk	18
Přílohy	19

Úvod

Využití robotických hejn(robotic swarms) patří mezi rentabilní metody pro řešení složitějších úkolů. Zdá se, že velký počet jednoduchých robotů dokáže plně nahradit komplexnější jedince. Dostatečná velikost hejna umožní řešení úloh, které by jednotlivec z hejna provést nesvedl. Navíc přináší několik výhod, díky kvantitě jsou odolnější proti poškození či zničení, neboli zbytek robotů pokračuje v plnění cílů. Dále výroba jednodušších robotů vychází levněji než komplexní jedinců, což přináší vhodnou výhodu pro práci v nebezpečném prostředí. Hejno také může pokrývat vícero různých úkolů než specializovaný robot, který bude při plnění úkolů lišících se od typu úloh zamýšlených při konstrukci mnohem více nemotorný a nejspíše pomalejší. Hejno pokryje větší plochu při plnění úkolů.

Existuje mnoho aplikací robotických hejn, většinou se používají k úlohům týkajících se průzkumu a mapování prostředí, hledání nejkratších cest, nasazení robotů v nebezpečných místech (Jevtić a Andina de la Fuente, 2007). Jako příklad můžeme uvést asistenci záchraným složkám při požáru (Penders a kol., 2011). Mnoho projektů zabývajících se řízením robotického hejna se inspiroje přírodou, používá se analogie k chování mravenců a jiného hmyzu (David a kol., 2001). Objevují se i harwarové implementace chování hejn, zmiňme projekty Swarm-bots (professor Marco Dorigo, 2001), Colias (Arvin a kol., n.d.)

Elementárnost senzorů i efektorů jednotlivých robotů vybízí k použití genetického programování, jelikož prostor řešení je velmi velký a plnění cílu lze vhodně ohodnotit. Dokonce na toto téma také vzniklo několik vědeckých prací (Gomes a kol., 2013) (Ivan a kol., 2013).

Cíl práce

Všechny zmíněné práce používají pro tvorbu řídicích programů genetické programování (GP) pracují s homogenními hejny. Cílem této práce je vyzkoušet využití GP na generování chování hejna heterogenních robotů, tedy skupiny robotů, kde se objevuje několik druhů jedinců a společně plní daný úkol. V rámci práce byl sestaven program pro simulaci různých scénářů a poz jejich úspěšnosti v rámci GP. Byli zvoleny 3 odlišné scénáře, kde se objevují 2-3 druhy robotů.

Struktura práce

Rozdělení práce je následující. První kapitola je věnována obecnému úvodu do tematiky genetického programování.

1. Evoluční algoritmy

1.1 Historie

Začneme pohledem do historie Evolučních algoritmů na základě knih (Mitchell, 1998) a (Eiben, 2015). Darwinova myšlenka evoluce lákala vědce už před průlomem počítačů, Turing vyslovil myšlenku *genetického a evolučního vyhledávání* už v roce 1948. V 50. a 60. letech nezávisle na sobě vznikají 4 hlavní teorie nesoucí podobnou myšlenku. Společným základem všech teorií byla evoluce populace kandidátů na řešení daného problému a jejich následná úprava způsoby hromadně nazývány jako genetické operátory, například mutace genů, přirozená selekce úspěšnějších řešení.

Rechenberg a Schwefell (1965, 1973) představuje *Evoluční strategie*, metoda optimalizující parametry v reálných číslech, jejich použití pro letadlová křídla. Fogel, Owens, Walsh zveřejňují *evolutionary programming* (evoluční programování), technika využívající k reprezentaci kandidátů konečný automat (s konečným počtem stavů), který je vyvíjen mutací přechodů mezi stavy a následnou selekcí. *Genetické algoritmy* vynalezl Holland v 60. letech a následně se svými studenty a kolegy z Michiganské Univerzity implementoval, oproti ES a EP nebylo hlavním cílem formovat algoritmus pro řešení konkrétních problémů, ale přenos obecného mechanismu evoluce jako metody aplikovatelné v informatickém světě. Princip GA spočívá v transformaci populace chromozomů (př. vektor 1 a 0) v novou populaci pomocí genetických operátorů křížení, mutací a inverze. V 1975 v knize *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (Holland, 1976) definoval genetický algoritmus jako abstrakci biologické evoluce spolu s teoretickým základem jejich používání. Ovšem někteří vědci používají pojem GA i ve významech hodně vzdálených původní Holandově definici. K sjednocení jednotlivých přístupů přispěl v 90. letech Koza, dále jsou všechny zahrnuty jako oblasti *Evolučních algoritmů*. Dnes existuje řada konferencí a odborných časopisů sdružující pracovníky zabývající se touto oblastí. Zmíníme ty větší z nich, co se týče konferencí: GECCO, PPSN, CEC, EVOSTAR, časopisy: Evolutionary Computation, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Genetic Programming and Evolvable Machines, Swarm and Evolutionary Computation

1.2 Co je evoluční algoritmus?

Ač existuje mnoho variant evolučních algoritmů, jak jsme zmínili v krátké pohledu do historie, spojuje je společná myšlenka populace jedinců uvnitř prostředí s omezenými podmínkami. Jedinci, jinak také nazývaní kandidáti, soutěží o zdroje daného prostředí, tím je docíleno přírodní selekce (, přežijí jen Ti nejlepší). Pokud budeme mít k dispozici kvalitativní funkci, kterou se snažíme maximalizovat. Pak nebude problém vytvořit náhodné jedince z definičního oboru přesně této funkce. Náhodně vzniklé jedince můžeme ohodnotit, tímto způsobem dáme vzniku abstraktu pro měření fitness (, z anglického fit nejvíce vhodný). Z vzniklých a ohodnocených jedinců lze zvolit ty nejlepší pro tvorbu nové generace jedinců. Tvorba nové generace probíhá kombinováním zvolených rodičů a mutacemi

jedinců. Jako kombinaci uvažujeme operátor, který je aplikován na 2-více zvolených kandidátů(, proto se jim také říká rodiče,) a tvořící 1-více nových jedinců(, také nazývány děti). Mutace je aplikována pouze na 1 jedince a její výsledkem je také pouze 1 jedinec. Tyto dvě operace aplikované na rodičovskou generaci vedou k vytvoření nových kandidátů(potomků,offsprings). I tato nová generace je ohodnocena fitness a dále soutěží se starými jedinci na základě fitness(, občas také v závislosti na stáří kandidáta,) o místo v nové generaci. Popsaný proces je opakován dokud není nalezen kandidát s dostatečně velkou fitness nebo narazíme na výpoční limit(, bylo dosaženo požadovaného počtu opakování apod). Základy Evolučního systému pohání 2 základní hnací síly: variační operátory, selektivní operátory. Variační operátory zajišťují potřebnou různorodost v populaci a tím tvoří nové cesty k úspěšnému kandidátovi.

TODO: Obrazek

Ze schéma na obrázku můžeme vyčíst, že EA patří mezi algoritmy generate and test (vygeneruj a vyzkoušej): Vyhodnocení fitness funkce poskytuje heuristický odhad kvality řešení, pro hledávací proces je řízen variací a selekcí.

1.2.1 Jedinec

Jedinec reprezentuje kandidáta na řešení problému. Může být reprezentován různými způsoby, např. v kontextu l-bitové vektory(GA), konečné automaty(EP), reálné vektory(ES).

1.2.2 Populace

Populace označuje množinu jedinců.

1.2.3 Generace

Generace je populaci jednotlivého kroku EA.

1.2.4 Fitness

Fitness je funkce, která každému jedinci přiřadí reálné číslo, slouží k ohodnocení úspěšnosti kandidáta v kontextu řešeného problému. Pomocí EA se snažíme maximalizovat fitness v rámci další generace. Cíle EA je tedy nalézt jedince s nejvyšší fitness.

1.2.5 Kritérium ukončení

Kritérium ukončení určuje koncovou podmínky pro ukončení prohledávání prostoru řešení. Většinou se jedná o počet generací, časový limit nebo dosažení určité hodnoty fitness.

1.2.6 Základ EA

Nejdříve se náhodně vygenerujeme inicializační populaci($P(0)$), ohodnotíme jedince pomocí fitness funkce. Dokud není splněno koncové kritérium opakujeme následující algoritmus z $P(t)$ vytvářej $P(t+1)$.

- Výběr z rodičů
- Rekombinace jedinců a jejich následná mutace, co odpovídá vzniku nových jedinců
- Ohodnocení nově vzniklých jedinců
- Enviromentální selekce ta vybere $P(t+1)$ z $P(t)$ a nově vzniklých jedinců

2. Odkazy na literaturu

Odkazy na literaturu vytváříme nejlépe pomocí příkazů `\citet`, `\citep` atp. (viz L^AT_EXový balíček `natbib`) a následného použití BibT_EXu. V matematickém textu obvykle odkazujeme stylem „Jméno autora/autorů (rok vydání)“, resp. „Jméno autora/autorů [číslo odkazu]“. V českém/slovenském textu je potřeba se navíc vypořádat s nutností skloňovat jméno autora, respektive přechylovat jméno autorky. Je potřeba mít na paměti, že standardní příkazy `\citet`, `\citep` produkují referenci se jménem autora/autorů v prvním pádě a jména autorek jsou nepřechýlena.

Pokud nepoužíváme bibT_EX, řídíme se normou ISO 690 a zvyklostmi oboru. Jména časopisů lze uvádět zkráceně, ale pouze v kodifikované podobě.

2.1 Několik ukázek

Mezi nejvíce citované statistické články patří práce Kaplana a Meiera a Coxe (??). ? napsal článek o t-testu.

Prof. Anděl je autorem učebnice matematické statistiky (viz ?). Teorii odhadu se věnuje práce ?. V případě odkazů na specifickou informaci (definice, důkaz, ...) uvedenou v knize bývá užitečné uvést specificky číslo kapitoly, číslo věty atp. obsahující požadovanou informaci, např. viz ?, Věta 4.22 nebo (viz ?, Věta 4.22).

Mnoho článků je výsledkem spolupráce celé řady osob. Při odkazování v textu na článek se třemi autory obvykle při prvním výskytu uvedeme plný seznam: ? představili koncept EM algoritmu. Respektive: Koncept EM algoritmu byl představen v práci Dempstera, Lairdové a Rubina (?). Při každém dalším výskytu již používáme zkrácenou verzi: ? nabízejí též několik příkladů použití EM algoritmu. Respektive: Několik příkladů použití EM algoritmu lze nalézt též v práci Dempstera a kol. (?).

U článku s více než třemi autory odkazujeme vždy zkrácenou formou: První výsledky projektu ACCEPT jsou uvedeny v práci Genbergové a kol. (?). V textu *nenapíšeme*: První výsledky projektu ACCEPT jsou uvedeny v práci ?.

3. Tabulky, obrázky, programy

Používání tabulek a grafů v odborném textu má některá společná pravidla a některá specifická. Tabulky a grafy neuvádíme přímo do textu, ale umístíme je buď na samostatné stránky nebo na vyhrazené místo v horní nebo dolní části běžných stránek. L^AT_EX se o umístění plovoucích grafů a tabulek postará automaticky.

Každý graf a tabulku očíslovujeme a umístíme pod ně legendu. Legenda má popisovat obsah grafu či tabulky tak podrobně, aby jim čtenář rozuměl bez důkladného studování textu práce.

Na každou tabulku a graf musí být v textu odkaz pomocí jejich čísla. Na příslušném místě textu pak shrneme ty nejdůležitější závěry, které lze z tabulky či grafu učinit. Text by měl být čitelný a srozumitelný i bez prohlížení tabulek a grafů a tabulky a grafy by měly být srozumitelné i bez podrobné četby textu.

Na tabulky a grafy odkazujeme pokud možno nepřímou v průběhu běžného toku textu; místo „*Tabulka 3.1 ukazuje, že muži jsou v průměru o 9,9 kg těžší než ženy*“ raději napíšeme „*Muži jsou o 9,9 kg těžší než ženy (viz Tabulka 3.1)*“.

3.1 Tabulky

U **tabulek** se doporučuje dodržovat následující pravidla:

- Vyhybat se svislým linkám. Silnějšími vodorovnými linkami oddělit tabulku od okolního textu včetně legendy, slabšími vodorovnými linkami oddělovat záhlaví sloupců od těla tabulky a jednotlivé části tabulky mezi sebou. V L^AT_EXu tuto podobu tabulek implementuje balík `booktabs`. Chceme-li výrazněji oddělit některé sloupce od jiných, vložíme mezi ně větší mezeru.
- Neměnit typ, formát a význam obsahu políček v tomtéž sloupci (není dobré do téhož sloupce zapisovat tu průměr, onde procenta).
- Neopakovat tentýž obsah políček mnohokrát za sebou. Máme-li sloupec *Rozptyl*, který v prvních deseti řádcích obsahuje hodnotu 0,5 a v druhých deseti řádcích hodnotu 1,5, pak tento sloupec raději zrušíme a vyřešíme to jinak. Například můžeme tabulku rozdělit na dvě nebo do ní vložit popisné řádky, které informují o nějaké proměnné hodnotě opakující se v následujícím oddíle tabulky (např. „*Rozptyl = 0,5*“ a níže „*Rozptyl = 1,5*“).
- Čísla v tabulce zarovnávat na desetinnou čárku.

Efekt	Odhad	Směrod. chyba ^a	P-hodnota
Abs. člen	−10,01	1,01	—
Pohlaví (muž)	9,89	5,98	0,098
Výška (cm)	0,78	0,12	< 0,001

Pozn: ^a Směrodatná chyba odhadu metodou Monte Carlo.

Tabulka 3.1: Maximálně věrohodné odhady v modelu M.

- V tabulce je někdy potřebné používat zkratky, které se jinde nevyskytují. Tyto zkratky můžeme vysvětlit v legendě nebo v poznámkách pod tabulkou. Poznámky pod tabulkou můžeme využít i k podrobnějšímu vysvětlení významu některých sloupců nebo hodnot.

3.2 Obrázky

Několik rad týkajících se obrázků a grafů.

- Graf by měl být vytvořen ve velikosti, v níž bude použit v práci. Zmenšení příliš velkého grafu vede ke špatné čitelnosti popisků.
- Osy grafu musí být řádně popsány ve stejném jazyce, v jakém je psána práce (absenci diakritiky lze tolerovat). Kreslíme-li graf hmotnosti proti výšce, nenecháme na nich popisky **ht** a **wt**, ale osy popíšeme *Výška [cm]* a *Hmotnost [kg]*. Kreslíme-li graf funkce $h(x)$, popíšeme osy x a $h(x)$. Každá osa musí mít jasně určenou škálu.
- Chceme-li na dvourozměrném grafu vyznačit velké množství bodů, dáme pozor, aby se neslily do jednolitě černé tmy. Je-li bodů mnoho, zmenšíme velikost symbolu, kterým je vykresluje, anebo vybereme jen malou část bodů, kterou do grafu zaneseme. Grafy, které obsahují tisíce bodů, dělají problémy hlavně v elektronických dokumentech, protože výrazně zvětšují velikost souborů.
- Budeme-li práci tisknout černobíle, vyhneme se používání barev. Čáry rozlišujeme typem (plná, tečkovaná, čerchovaná, ...), plochy dostatečně rozdílnými intenzitami šedé nebo šrafováním. Význam jednotlivých typů čar a ploch vysvětlíme buď v textové legendě ke grafu anebo v grafické legendě, která je přímo součástí obrázku.
- Vyhýbejte se bitmapovým obrázkům o nízkém rozlišení a zejména JPEGům (zuby a kompresní artefakty nevypadají na papíře pěkně). Lepší je vytvářet obrázky vektorově a vložit do textu jako PDF.

3.3 Programy

Algoritmy, výpisy programů a popis interakce s programy je vhodné odlišit od ostatního textu. Jednou z možností je použití L^AT_EXového balíčku **fancyvrb** (fancy verbatim), pomocí něhož je v souboru **makra.tex** nadefinováno prostředí **code**. Pomocí něho lze vytvořit např. následující ukázky.

```
> mean(x)
[1] 158.90
> objekt$prumer
[1] 158.90
```

Menší písmo:

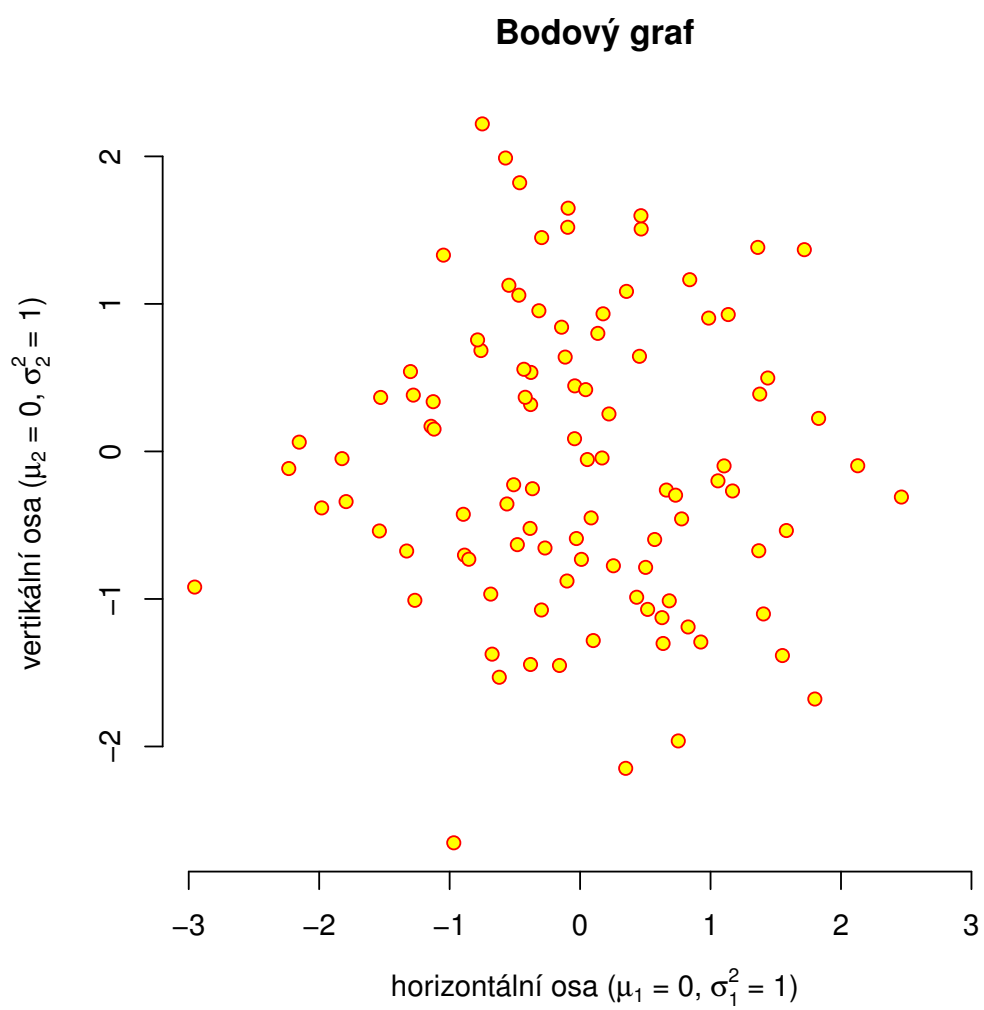
```
> mean(x)
[1] 158.90
> objekt$prumer
[1] 158.90
```

Bez rámečku:

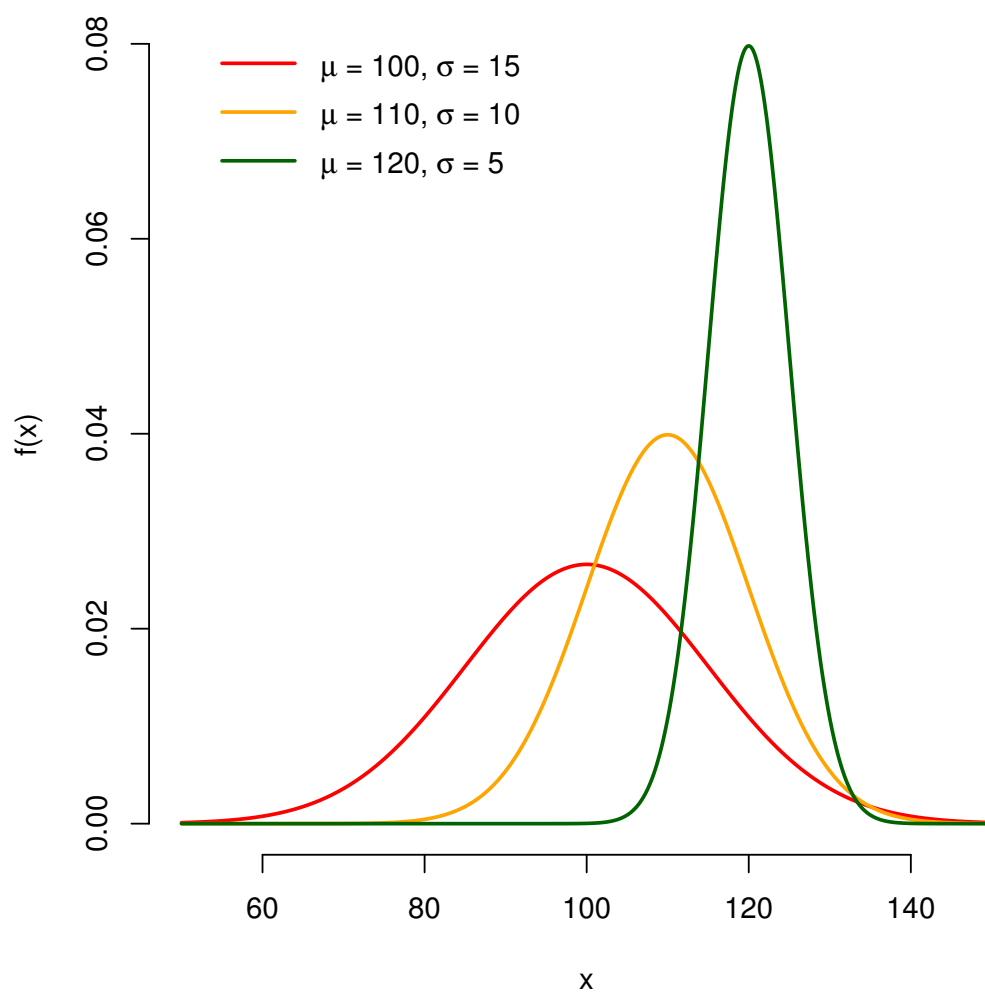
```
> mean(x)
[1] 158.90
> objekt$prumer
[1] 158.90
```

Užší rámeček:

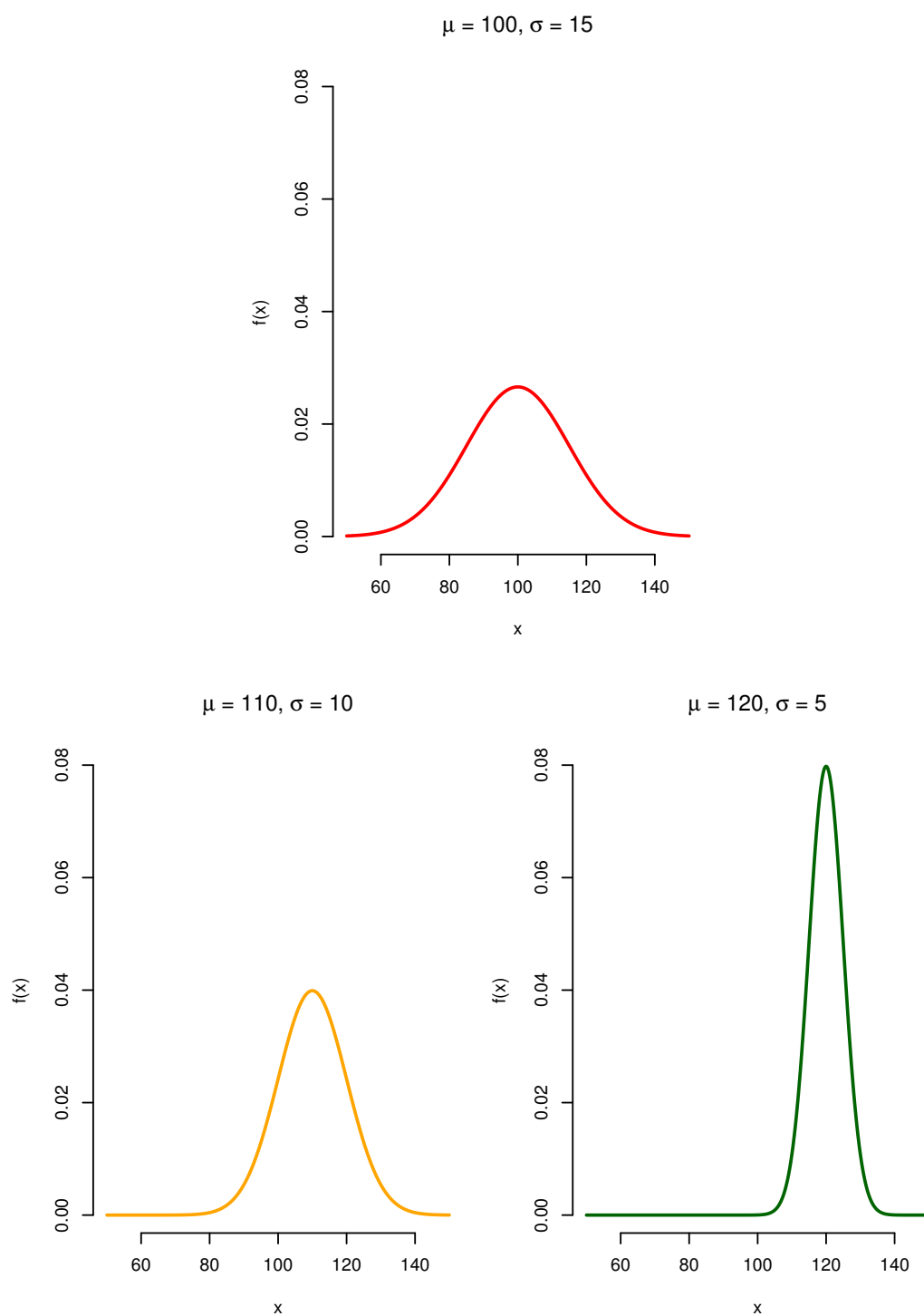
```
> mean(x)
[1] 158.90
> objekt$prumer
[1] 158.90
```



Obrázek 3.1: Náhodný výběr z rozdělení $\mathcal{N}_2(\mathbf{0}, I)$.



Obrázek 3.2: Hustoty několika normálních rozdělení.



Obrázek 3.3: Hustoty několika normálních rozdělení.

4. Formát PDF/A

Opatření rektora č. 23/2016 určuje, že elektronická podoba závěrečných prací musí být odevzdávána ve formátu PDF/A úrovně 1a nebo 2u. To jsou profily formátu PDF určující, jaké vlastnosti PDF je povoleno používat, aby byly dokumenty vhodné k dlouhodobé archivaci a dalšímu automatickému zpracování. Dále se budeme zabývat úrovní 2u, kterou sázíme \TeX .

Mezi nejdůležitější požadavky PDF/A-2u patří:

- Všechny fonty musí být zabudovány uvnitř dokumentu. Nejsou přípustné odkazy na externí fonty (ani na „systémové“, jako je Helvetica nebo Times).
- Fonty musí obsahovat tabulku ToUnicode, která definuje převod z kódování znaků použitého uvnitř fontu to Unicode. Díky tomu je možné z dokumentu spolehlivě extrahovat text.
- Dokument musí obsahovat metadata ve formátu XMP a je-li barevný, pak také formální specifikaci barevného prostoru.

Tato šablona používá balíček `pdfx`, který umí \LaTeX nastavit tak, aby požadavky PDF/A splňoval. Metadata v XMP se generují automaticky podle informací v souboru `prace.xmpdata` (na vygenerovaný soubor se můžete podívat v `pdfa.xmpi`).

Validitu PDF/A můžete zkontrolovat pomocí nástroje VeraPDF, který je k dispozici na <http://verapdf.org/>.

Pokud soubor nebude validní, mezi obvyklé příčiny patří používání méně obvyklých fontů (které se vkládají pouze v bitmapové podobě a/nebo bez unicodových tabulek) a vkládání obrázků v PDF, které samy o sobě standard PDF/A nesplňují.

Je pravděpodobné, že se to týká obrázků vytvářených mnoha různými programy. V takovém případě se můžete pokusit obrázek zkonvertovat do PDF/A pomocí GhostScriptu, například takto:

```
gs -q -dNOPAUSE -dBATCH
   -sDEVICE=pdfwrite -dPDFSETTINGS=/prepress
   -sOutputFile=vystup.pdf vstup.pdf
```

Jelikož PDF/A je v \TeX ověm světě (a nejen tam) novinkou, budeme rádi za vaše zkušenosti.

Závěr

Seznam použité literatury

- ARVIN, F., MURRAY, J., ZHANG, C. a YUE, S. (n.d.). Colias: An autonomous micro robot for swarm robotic applications. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEMS*, **11**. ISSN 17298806. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?authtype=shib&custid=s1240919&profile=eds>.
- DAVID, P., MIKE, D., REGINA, E., MIKE, H. a CRAIG, L. (2001). Pheromone robotics. *Autonomous Robots*, (3), 319. ISSN 0929-5593. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?authtype=shib&custid=s1240919&profile=eds>.
- EIBEN, A. (2015). *Introduction to evolutionary computing*. Springer, Berlin. ISBN 978-3662448731.
- GOMES, J. C., URBANO, P. a CHRISTENSEN, A. L. (2013). Evolution of swarm robotics systems with novelty search. *CoRR*, **abs/1304.3362**. URL <http://arxiv.org/abs/1304.3362>.
- HOLLAND, J. H. (1976). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, volume 18. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?authtype=shib&custid=s1240919&profile=eds>.
- IVAN, T., TÜZE, K. a KATSUNORI, S. (2013). Hormone-inspired behaviour switching for the control of collective robotic organisms. *Robotics, Vol 2, Iss 3, Pp 165-184 (2013)*, (3), 165. ISSN 2218-6581. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?authtype=shib&custid=s1240919&profile=eds>.
- JEVTIĆ, A. a ANDINA DE LA FUENTE, D. (2007). Swarm intelligence and its applications in swarm robotics.
- MITCHELL, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. Complex adaptive systems. Cambridge : MIT Press, 1998. ISBN 0-262-13316-4. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?authtype=shib&custid=s1240919&profile=eds>.
- PENDERS, J., ALBOUL, L., WITKOWSKI, U., NAGHSH, A., SAEZ-PONS, J., HERBRECHTSMEIER, S. a EL-HABBAL, M. (2011). A robot swarm assisting a human fire-fighter. *Advanced Robotics*, **25**(1/2), 93 – 117. ISSN 01691864. URL <http://search.ebscohost.com/login.aspx?authtype=shib&custid=s1240919&profile=eds>.
- PROFESSOR MARCO DORIGO (2001). Swarm-bots. URL <http://www.swarm-bots.org>.

Seznam obrázků

3.1	Náhodný výběr z rozdělení $\mathcal{N}_2(\mathbf{0}, I)$	10
3.2	Hustoty několika normálních rozdělení.	11
3.3	Hustoty několika normálních rozdělení.	12

Seznam tabulek

3.1	Maximálně věrohodné odhady v modelu M.	7
-----	--	---

Seznam použitých zkratek

Přílohy