

Komponenta výukového serveru TI - P-úplné problémy

Component of Teaching Server for Theoretical Computer Science - Pcomplete problems

Tomáš Kirnig

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Martin Kot, Ph.D.

Ostrava, 2025

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Kirnig

Studijní program:

B0613A140014 Informatika

Téma:

Komponenta výukového serveru TI - P-úplné problémy
Component of Teaching Server for Theoretical Computer Science - P-
complete problems

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomových a bakalářských prací vzniká výukový server pro předměty teoretické informatiky. Jedná se o sadu dynamických webových stránek umožňujících studentům pochopení různých typů úloh a problémů. Na rozdíl od běžných výukových textů s pevně daným počtem ukázkových příkladů umí tyto stránky generovat libovolně mnoho ukázek na základě vstupů od uživatele. Cílem této konkrétní bakalářské práce je vytvořit komponentu pro pomoc s výukou tzv. P-úplných problémů.

Vytvořte dynamické webové stránky umožňující uživateli následující:

1. Simulovat výpočet řešení problému Monotone Circuit Value Problem (MCVP) a alespoň 2 dalších P-úplných problémů.
2. Vstupy těchto algoritmů bude moci uživatel zadávat třemi způsoby:
 - a) Vhodným, uživatelsky přívětivým, způsobem ručně.
 - b) Nechat si vstup vygenerovat zcela náhodně podle nastavených parametrů.
 - c) Vybrat z předpřipravené sady vhodně zvolených vstupů.
3. Bude možné si zobrazit převod instance problému MCVP na ty dva zvolené P-úplné problémy. Přitom:
 - a) Instanci MCVP pro převod bude možné zadat kterýmkoliv z výše uvedených způsobů.
 - b) Převod si bude moci uživatel krokovat se zobrazením slovního vysvětlení jednotlivých kroků.
 - c) Na převodem vytvořenou instanci bude opět možné použít výše požadovanou simulaci výpočtu řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Miyano, S., Shiraishi, S., Shoudai, T.: "A List of P-Complete Problems", Kyushu University, RIFIS-TR-CS-17, December 1990, dostupné z URL: https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/opac_download_md/3123/rifis-tr-17.pdf
- [2] Sawa, Z.: "Teoretická informatika", podklady pro přednášky, VŠB - Technická univerzita Ostrava, dostupné z URL: <https://www.cs.vsb.cz/sawa/ti/slides/ti-slides-03.pdf>
- [3] Papadimitriou, C.: Computational Complexity, Addison Wesley, 1993
- [4] Arora, S., Barak, B.: Computational Complexity: A Modern Approach, Cambridge University Press, 2009

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Kot, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2024

Datum odevzdání: 30.04.2025

Garant studijního programu: doc. Mgr. Miloš Kudělka, Ph.D.

V IS EDISON zadáno: 30.10.2024 09:50:55

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem výukové webové aplikace pro demonstraci P-úplných problémů. Hlavním cílem je usnadnit studentům pochopení a procvičení takových úloh. Aplikace se zaměřuje na *Monotone Circuit Value Problem* (MCVP), *prázdnou gramatiku* a *kombinatorickou hru*. V rámci práce jsou implementovány moduly pro interaktivní zadávání vstupů uživatelem (ručně, náhodnou generací nebo výběrem z připravené sady) a simulaci výpočtu řešení. Uživatel má rovněž možnost sledovat krokovatelny převod instance MCVP na ostatní zmíněné problémy a následně i jejich samotné řešení.

Klíčová slova

Teoretická informatika, P-úplné problémy, Monotone Circuit Value Problem, webová aplikace, simulace, převod instancí

Abstract

This bachelor's thesis focuses on the development of a teaching-oriented web application for illustrating P-complete problems. The main goal is to facilitate students' understanding and practice of such tasks. The application focuses on the *Monotone Circuit Value Problem* (MCVP), *Empty Grammar*, and the *Combinatorial Game*. The project implements modules for interactive input of problem instances (manually, via random generation, or by selecting from a pre-defined set) and provides a simulation of their solutions. Users can also observe a step-by-step reduction from an MCVP instance to the other mentioned problems and subsequently explore how those are solved. The resulting application demonstrates key concepts of theoretical computer science, including the notion of P-completeness, and provides a flexible basis for educational use.

Keywords

Theoretical computer science, P-complete problems, Monotone Circuit Value Problem, web application, simulation, instance reduction

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	6
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	8
1 Úvod	9
2 Použité technologie a architektura	11
3 Monotone Circuit Value Problem	12
4 Kombinatorické hry na grafu	13
5 Prázdnot bezkontextových gramatik	14
6 Závěr	15
Literatura	16
Přílohy	16
A Dlouhý zdrojový kód	17

Seznam použitých zkratek a symbolů

MCVP	– Monotone Circuit Value Problem
PC	– P-complete
BFS	– Breadth-First Search
DFS	– Depth-First Search

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Kapitola 1

Úvod

Teoretická informatika tvoří matematický základ pro pochopení možností a limitů výpočetních systémů. V jejím jádru leží teorie složitosti, která klasifikuje problémy na základě zdrojů potřebných k jejich vyřešení, jako je čas a paměť. Jednou z nejznámějších a nejdůležitějších složitostních tříd je třída P , zahrnující problémy, které lze vyřešit v polynomiálním čase na deterministickém Turingově stroji [1]. Ačkoliv jsou problémy v třídě P v kontextu teoretické informatiky často označovány za „efektivně řešitelné“, praxe ukazuje, že ne všechny jsou si rovny, zejména pokud uvažujeme o možnostech jejich paralelizace.

Zde vstupuje do popředí koncept *P-úplnosti* (P-completeness). P-úplné problémy představují ty nejtěžší úlohy uvnitř třídy P . Jsou to problémy, na které lze v logaritmickém prostoru redukovat jakýkoliv jiný problém z P . Význam této klasifikace spočívá v hypotéze, že P-úplné problémy pravděpodobně nelze efektivně paralelizovat (tj. nepatří do třídy NC), a jejich řešení je tedy inherentně sekvenční [2]. Studium těchto problémů nám tak pomáhá porozumět hranicím mezi tím, co můžeme urychlit přidáním výpočetního výkonu, a tím, kde musíme postupovat krok za krokem.

Výuka těchto konceptů však naráží na značné překážky. Abstrakce redukcí mezi problémy a formální definice složitostních tříd jsou pro studenty často obtížně uchopitelné pouze prostřednictvím statických textů či diagramů. Zatímco pro základní algoritmy (třídění, vyhledávání) existuje řada vizualizačních nástrojů, oblast složitosti – a konkrétně P-úplnost – zůstává v edukačním softwaru často opomíjena. Cílem této práce je tuto mezeru zaplnit a poskytnout interaktivní nástroj, který převede abstraktní definice do dynamické a vizuální podoby.

Jako ústřední problém pro tuto práci byl zvolen *Monotone Circuit Value Problem* (MCVP). Jedná se o kanonický P-úplný problém, který spočívá ve vyhodnocení logického obvodu složeného z monotonních hradel (AND, OR) [3]. MCVP je ideálním kandidátem pro výuku, protože přirozeně modeluje tok výpočtu. Aplikace vyvinutá v rámci této práce však nezůstává pouze u MCVP. Abychom demonstrovali univerzálnost konceptu P-úplnosti, implementujeme také simulace dvou dalších problémů z odlišných domén:

- **Kombinatorické hry na grafu:** Úloha, která analyzuje vítězné strategie v deterministických hrách dvou hráčů, což propojuje teorii složitosti s teorií her.
- **Prázdnot bezkontextových gramatik:** Problém z oblasti formálních jazyků, zjišťující, zda daná gramatika generuje alespoň jedno slovo složené z terminálních symbolů [4].

Klíčovým přínosem vytvořené aplikace není pouze možnost tyto problémy izolovaně řešit, ale především schopnost vizualizovat *převody* (redukce) mezi nimi. Uživatel může sledovat, jak se instance MCVP transformuje na instanci hry nebo gramatiky, což názorně demonstuje princip, že vyřešení jednoho P-úplného problému umožňuje vyřešit jakýkoliv jiný. Tento proces je doprovázen vizualizací změn stavu a slovním popisem, což studentům umožňuje nahlédnout "pod kapotu" polynomiálních redukcí [2].

Výsledkem práce je moderní webová aplikace, která slouží jako flexibilní výuková komponenta. Umožňuje uživatelům experimentovat s vlastními vstupy, generovat náhodné instance pro testování hypotéz a využívat předpřipravené sady úloh pro řízenou výuku.

Text práce je členěn do několika logických celků. Po úvodu následuje kapitola věnovaná použitým technologiím a architektuře aplikace. Jádro práce tvoří tři kapitoly, z nichž každá se detailně věnuje jednomu z implementovaných problémů: nejprve Monotone Circuit Value Problem (MCVP), následně kombinatorické hry na grafu a nakonec problém prázdnot bezkontextových gramatik. Závěr práce shrnuje dosažené výsledky a navrhuje možnosti dalšího rozšíření.

Kapitola 2

Použité technologie a architektura

Kapitola 3

Monotone Circuit Value Problem

Kapitola 4

Kombinatorické hry na grafu

Kapitola 5

Prázdnot bezkontextových gramatik

Kapitola 6

Závěr

Literatura

1. PAPADIMITRIOU, Christos H. *Computational Complexity*. Addison-Wesley, 1993. ISBN 978-0201530827.
2. ARORA, Sanjeev; BARAK, Boaz. *Computational Complexity: A Modern Approach*. Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0521424264.
3. MIYANO, S.; SHIRAISHI, S.; SHOUDAI, T. *A List of P-Complete Problems*. 1990. Tech. zpr., RIFIS-TR-CS-17. Kyushu University. Dostupné také z: https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/opac_download_md/3123/rifis-tr-17.pdf.
4. SAWA, Zbyněk. *Teoretická informatika – Podklady pro přednášky* [Online]. 2024. Dostupné také z: <https://www.cs.vsb.cz/sawa/ti/slides/ti-slides-03.pdf>.

Příloha A

Dlouhý zdrojový kód