

Real-Time Collaborative Editing of Documents

by

Your Name

A thesis
presented to the University of Waterloo
in fulfillment of the
thesis requirement for the degree of
Doctor of Philosophy
in
Computer Science

Waterloo, Ontario, Canada, 2026

© Your Name 2026

Examining Committee Membership

The following served on the Examining Committee for this thesis. The decision of the Examining Committee is by majority vote.

External Examiner: Name Surname
Professor, Dept. of Computer Science, University of Toronto

Supervisor(s): Name Surname
Professor, Cheriton School of Computer Science
Name Surname
Associate Professor, Dept. of Pure Mathematics

Internal Member: Name Surname
Professor, Cheriton School of Computer Science

Internal-External Member: Name Surname
Professor, Dept. of Electrical and Computer Engineering

Other Member(s): Name Surname
Professor, Dept. of Statistics and Actuarial Science

Author's Declaration

I hereby declare that I am the sole author of this thesis. This is a true copy of the thesis, including any required final revisions, as accepted by my examiners.

I understand that my thesis may be made electronically available to the public.

Abstract

This thesis compares two approaches to synchronising a document that several people edit at the same time, operational transformation and conflict-free replicated data types, and evaluates both on a prototype of a web editor. The abstract should summarise the problem, the method, the results and the conclusions of the work, and be readable on its own.

Acknowledgements

I would like to thank my supervisor for the guidance throughout this work, and my colleagues at the institute for the many discussions that shaped it.

Dedication

To my family.

Table of Contents

Examining Committee Membership	ii
Author's Declaration	iii
Abstract	iv
Acknowledgements	v
Dedication	vi
List of Figures	ix
List of Tables	x
Úvod	1
1 Společná editace dokumentů	2
1.1 Požadavky na systém	3
2 Přístupy k synchronizaci	4
2.1 Operační transformace	4
2.1.1 Transformační funkce	4
2.2 Bezkonfliktní replikované datové typy	5

3	Návrh a implementace	6
3.1	Ukládání historie	7
4	Vyhodnocení	8
4.1	Diskuse výsledků	9
	Závěr	10
	Literatura	11
	APPENDICES	12
A	Supplementary Material	13

List of Figures

1.1	Typický průběh společného psaní dokumentu	3
4.1	Počet úprav podle dne v týdnu a hodiny ve sledovaných relacích	9

List of Tables

4.1	Průměrná latence a velikost uložených dat podle počtu uživatelů	8
-----	---	---

Úvod

Textové dokumenty dnes jen výjimečně vznikají v rukou jediného autora. Studenti píší seminární práce ve dvojicích, vývojáři společně udržují technickou dokumentaci a výzkumné týmy dokončují články na poslední chvíli z několika míst najednou. Aby takové psaní fungovalo, musí editor zajistit, že všichni účastníci vidí stejný text a že se žádná úprava neztratí.

Cílem této práce je porovnat dva hlavní přístupy k synchronizaci dokumentů při společné editaci v reálném čase, operační transformaci a bezkonfliktní replikované datové typy, a ověřit je na prototypu webového editoru. První kapitola vymezuje požadavky na takový systém, druhá popisuje oba přístupy, třetí návrh prototypu a čtvrtá výsledky měření.

Chapter 1

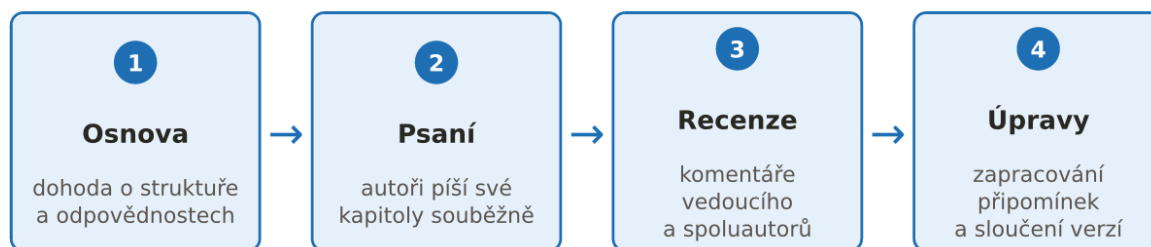
Společná editace dokumentů

Společnou editací rozumíme situaci, kdy více uživatelů upravuje tentýž dokument a jejich změny se navzájem propisují bez ručního slučování. Podle toho, jak rychle se změny šíří, rozlišujeme tři základní režimy práce:

- **asynchronní editace**, při níž si autoři předávají celé verze dokumentu a slučují je až dodatečně,
- **editace se zámkami**, kdy smí v jednu chvíli upravovat určitou část dokumentu jen jeden autor,
- **editace v reálném čase**, při níž se každá změna okamžitě promítne ostatním uživatelům.

Tato práce se zabývá výhradně posledním režimem. Ten je pro uživatele nejpohodlnější, ale klade největší nároky na návrh systému, protože změny vznikají souběžně na mnoha místech a přicházejí v různém pořadí.

Editace v reálném čase přitom nemění jen techniku, ale i průběh celé spolupráce. Typický postup společného psaní, jak jej popsali dotazovaní uživatelé, zachycuje [Figure 1.1](#).



kroky 2 až 4 se opakují, dokud recenze přináší podstatné připomínky

Figure 1.1: Typický průběh společného psaní dokumentu

1.1 Požadavky na systém

Z rozhovorů s uživateli existujících editorů a z odborné literatury jsme odvodili čtyři požadavky, které musí systém pro společnou editaci splnit:

1. konvergence, tedy po doručení všech změn mají všechny kopie dokumentu stejný obsah,
2. zachování záměru, tedy výsledek úpravy odpovídá tomu, co autor v okamžiku úpravy viděl,
3. odezva, tedy lokální úprava se projeví okamžitě bez čekání na server,
4. odolnost, tedy krátkodobý výpadek spojení nevede ke ztrátě rozepsaného textu.

První dva požadavky se týkají správnosti, zbylé dva použitelnosti. V praxi se ukazuje, že právě kombinace okamžité odezvy a zaručené konvergence je nejtěžší částí celého návrhu.

Chapter 2

Přístupy k synchronizaci

Systémy pro společnou editaci v reálném čase si každou změnu nejprve provedou lokálně a teprve potom ji rozešlou ostatním účastníkům. Liší se především tím, jak řeší situaci, kdy dvě změny vzniknou souběžně a každý účastník je obdrží v jiném pořadí.

2.1 Operační transformace

Operační transformace vychází z práce Ellise a Gibbse [1], kteří jako první popsali, jak upravit souběžnou operaci tak, aby ji bylo možné provést i po jiné operaci, o které její autor nevěděl. Každá úprava se zapisuje jako operace vložení nebo smazání na určité pozici v textu.

Pokud například jeden uživatel vloží slovo na začátek odstavce a druhý současně smaže slovo na jeho konci, musí se pozice mazání posunout o délku vloženého slova. Tento posun počítá transformační funkce.

2.1.1 Transformační funkce

Transformační funkce dostane dvojici souběžných operací a vrátí jejich upravené verze. Aby všechny kopie dokumentu konvergovaly, musí funkce splňovat takzvané transformační vlastnosti, jejichž dodržení je pro obecné operace obtížné dokázat. Většina nasazených systémů proto spoléhá na centrální server, který určuje jediné pořadí operací.

2.2 Bezkonfliktní replikované datové typy

Druhý přístup představují bezkonfliktní replikované datové typy, souhrnně označované zkratkou CRDT [2]. Místo dodatečné úpravy operací volí takovou reprezentaci dokumentu, v níž souběžné operace komutují a jejich pořadí nemá na výsledek vliv.

Replikovaný datový typ je bezkonfliktní, pokud libovolné dvě repliky, které obdržely stejnou množinu aktualizací, mají stejný stav bez ohledu na pořadí jejich doručení.

Každý znak dokumentu dostane jednoznačný identifikátor, který zůstává stejný po celou dobu existence znaku. Pozice vložení se pak neurčuje číslem, ale odkazem na identifikátor sousedního znaku, takže ji souběžné úpravy jinde v textu nemohou posunout.

Chapter 3

Návrh a implementace

Prototyp editoru se skládá z webového klienta, synchronizačního serveru a databáze, do níž server průběžně ukládá stav dokumentů. Klient i server jsou napsány tak, aby bylo možné synchronizační vrstvu vyměnit a porovnat oba popsané přístupy na stejném uživatelském rozhraní.

Klient udržuje lokální repliku dokumentu a každou úpravu uživatele převede na operaci nad replikovaným datovým typem. Operace se odesílají serveru po dávkách, aby se při rychlém psaní nezahltila síť. Zjednodušené zpracování příchozí dávky na serveru ukazuje následující výpis:

```
def zpracuj_davku(dokument, davka):
    for operace in davka.operace:
        if operace.id in dokument.pouzite:
            continue
        dokument.aplikuj(operace)
        dokument.pouzite.add(operace.id)
    rozesli_ostatnim(dokument.id, davka)
```

Protože operace komutují, nemusí server dávky řadit ani transformovat. Stačí, když zajistí, že se žádná operace neprovede dvakrát a že každá dávka dorazí ke všem připojeným klientům.

3.1 Ukládání historie

Server neukládá jen výsledný text, ale celý log operací. Z logu lze obnovit libovolnou dřívější verzi dokumentu a znovu sestavit stav repliky klienta, který byl delší dobu odpojen. Tento přístup odpovídá architektuře založené na neměnném záznamu událostí, jak ji popisuje Kleppmann [\[3\]](#). Aby log nerostl neomezeně, server jej v pravidelných intervalech zhušťuje do snímků.

Chapter 4

Vyhodnocení

Prototyp jsme porovnali s referenční implementací operační transformace na sadě záznamů skutečných editačních relací. Pro každou relaci jsme sledovali latenci, tedy dobu mezi úpravou u autora a jejím zobrazením u ostatních účastníků, a průměrnou latenci relace jsme spočítali podle (4.1):

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i^{\text{doručení}} - t_i^{\text{úprava}}) \quad (4.1)$$

kde n je počet operací v relaci. Naměřené hodnoty pro různý počet souběžně pracujících uživatelů shrnuje [Table 4.1](#).

Table 4.1: Průměrná latence a velikost uložených dat podle počtu uživatelů

Uživatelé	Latence OT (ms)	Latence CRDT (ms)	Data (kB)
2	38	35	12
5	52	41	19
10	87	48	31
20	164	63	58

S rostoucím počtem uživatelů roste latence operační transformace výrazně rychleji, protože server musí každou operaci transformovat proti všem souběžným operacím. Cenou za nižší latenci CRDT je větší objem uložených dat, neboť každý znak nese svůj identifikátor. Rozložení úprav v čase, z něhož vychází zátěžový test, ukazuje [Figure 4.1](#).

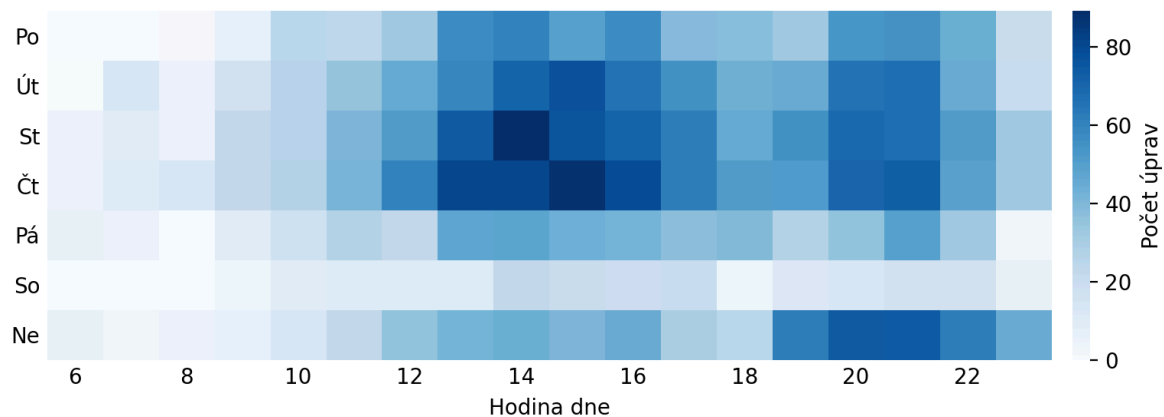


Figure 4.1: Počet úprav podle dne v týdnu a hodiny ve sledovaných relacích

4.1 Diskuse výsledků

Výsledky potvrzují, že pro menší týmy jsou oba přístupy rovnocenné a rozhoduje spíše jednoduchost implementace. Při větším počtu souběžných uživatelů má CRDT jasnou výhodu v latenci i v odolnosti vůči výpadkům spojení. Doplnující rozhovory s uživateli, vedené podle zásad kvalitativního výzkumu [4], ukázaly, že rozdíl v latenci pod sto milisekund uživatelé nevnímají, zato ztrátu rozepsaného textu po výpadku spojení považují za zásadní problém.

Závěr

Práce porovnála operační transformaci a bezkonfliktní replikované datové typy jako dva přístupy k synchronizaci dokumentů při společné editaci v reálném čase. Na prototypu webového editoru jsme ukázali, že CRDT umožňují jednodušší server bez centrálního řazení operací a při větším počtu uživatelů nabízejí nižší latenci.

Hlavní nevýhodou CRDT zůstává větší objem ukládaných dat. Dalším krokem proto bude ověřit, jak velikost dat ovlivňuje pravidelné zhušťování logu do snímků a jak se prototyp chová při dlouhodobém provozu s desítkami tisíc dokumentů.

Literatura

- [1] C. A. Ellis and S. J. Gibbs, “Concurrency control in groupware systems,” in *Proceedings of the 1989 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, New York: ACM, 1989, pp. 399–407. doi: [10.1145/67544.66963](https://doi.org/10.1145/67544.66963).
- [2] M. Shapiro, N. Preguiça, C. Baquero, and M. Zawirski, “Conflict-free replicated data types,” in *Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems*, Berlin: Springer, 2011, pp. 386–400. doi: [10.1007/978-3-642-24550-3_29](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24550-3_29).
- [3] M. Kleppmann, *Designing data-intensive applications*. Sebastopol: O’Reilly Media, 2017.
- [4] J. Hendl, *Kvalitativní výzkum: základní metody a aplikace*. Praha: Portál, 2005.

APPENDICES

Appendix A

Supplementary Material

An appendix holds material that supports the text but is not needed to follow it, such as the questionnaire of a survey, measurement data or a longer listing.