Gnarley Trees – vizualizácie dátových štruktúr

Katka Kotrlová* Pavol Lukča† Viktor Tomkovič‡ Tatiana Tóthová§

Školiteľ: Jakub Kováč[1]¶

Katedra informatiky, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: V tomto článku prezentujeme našu prácu na projekte Gnarley Trees, ktorý začal Jakub Kováč ako svoju bakalársku prácu. Gnarley Trees je projekt, ktorý má dve časti. Prvá časť sa zaoberá kompiláciou dátových štruktúr, ktoré majú stromovú štruktúru, ich popisom a popisom ich hlavných výhod a nevýhod oproti iným dátovým štruktúram. Druhá časť sa zaoberá ich vizualizáciou a vizualizáciou vybraných algoritmoch na týchto štruktúrach.

Kľúčové slová: Gnarley Trees, vizualizácia, algoritmy a dátové štruktúry

1 Úvod

Ako ľudia so záujmom o dátové štruktúry sme sa rozhodli pomôcť vybudovať dobrý softvér na vizualizáciu algoritmov a dátových štruktúr a obohatiť kompiláciu Jakuba Kováča (Kováč, 2007) o ďalšie dátové štruktúry. Vizualizujeme rôznorodé dátové štruktúry. Z binárnych vyvažovaných stromov to sú *finger tree* a *reversal tree*, z háld to sú *d-nárna halda*, *ľavicová halda*, *skew halda* a *párovacia halda*. Taktiež vizualizujeme aj *problém disjuktných množín (union-find problém)* a *písmenkový strom (trie)*.

Okrem vizualizácie prerábame softvér, doplnili sme ho o históriu krokov a operácií, jednoduchšie ovládanie a veľa iných vecí, zlepšujúcich celkový dojem. Softvér je celý v slovenčine a angličtine a je implementovaný v jazyku `Java`.

1.1 Vizualizácia

Dátové štruktúry a algoritmy tvoria základnú, prvotnú časť výučby informatiky. Vizualizácia algoritmov a dátových štruktúr je grafické znázornenie, ktoré abstrahuje spôsob ako algoritmus a dátové štruktúry pracujú od ich vnútornej reprezentácie a umiestnení v pamäti. Je teda vyhľadávaná a všeobecne rozšírená pomôcka pri výučbe. Výsledky výskumov ohľadne jej efektívnosti sa líšia, od stavu „nezaznamenali sme výrazné zlepšenie“ po „je viditeľné zlepšenie“. (Shaffer et al., 2010)

Rozmach vizualizačných algoritmov priniesla najmä Java a jej fungovanie bez viazanosti na konkrétny operačný systém. Kvalita vizualizácií sa líši a keďže ide o ľahko naprogramovateľné programy, je ich veľa a sú pomerne nekvalitné. V takomto množstve je ťažké nájsť kvalitné vizualizácie. Zbieraním a analyzovaním kvality sa venuje skupina AlgoViz, ktorá už veľa rokov funguje na portále `http://algoviz.org/`.

Zaujímavé je pozorovanie, že určovanie si vlastného tempa pri vizualizácií je veľká pomôcka. Naopak, ukazovanie pseudokódu alebo nemožnosť určenia si vlastného tempa (napríklad animácia bez možnosti pozastavenia), takmer žiadne zlepšenie neprináša. (Shaffer et al., 2010; Saraiya et al., 2004)

Motivácia

Z vyššie uvedeného je jasné, že našou snahou je vytvoriť kvalitnú kompiláciu a softvér, ktorý bude nezávislý od operačného systému, bude vyhovovať ako pomôcka pri výučbe ako aj pri samoštúdiu a bude voľne prístupný a náležite propagovaný. Toto sú hlavné body, ktoré nespĺňa žiaden slovenský a len veľmi málo svetových vizualizačných softvérov. Našou hlavnou snahou je teda ponúknuť plnohodnotné prostredie pri učení.

2 Rozšírenie predošlej práce

jednotlive vizualizacie a implementovane ficurie co sa zmenilo od bakalarky? zoomovanie, komentare, tree layouty, historia a nove ds

3 Vyvážené stromy

uz boli, pribudli

*`katkinemail,ktorýchcezverejniť`
†`palyhomail`
‡`viktor.tomkovic@gmail.com`
§`táničkinmail`
¶`hmm`

3.1 Finger tree

3.2 Reversal tree

Táňa, čiň sa!

4 Haldy

4.1 d-nárna halda

4.2 Ľavicová halda

4.3 Skew halda

4.4 Párovacia halda

Katka, zase spíš?! [citacie]

5 Union-Find

Popis. Sú problémy, ktoré vyžadujú spájanie objektov do množín a množín navzájom a následné určovanie, do ktorej množiny objekt patrí. Od takejto *dátovej štruktúry pre disjunktné množiny* očakávame, že si bude udržiavať jednoznačného *zástupcu* každej množiny a bude poskytovať tieto tri oprácie:

- **makeset** (x) – vytvorí novú množinu s jedným prvkom, ktorý nepatrí do žiadnej inej množiny;
- **find** (x) – nájde zástupcu množiny, v ktorej sa prvok x nachádza;
- **union** (x,y) – vytvorí novú množinu, ktorá obsahuje všetky prvky v množinách, ktorých zástupcovia sú x a y. Tieto množiny zmaže. Ďalej vyberie nového zástupcu novej množiny. Pre jednoduchosť, táto operácia predpokladá, že x a y sú zástupcovia množín.

Vďaka častej asociácií objektov a spájania množín ako vrcholy a hrany grafu sa často dátová štruktúra abstraktne reprezentuje ako *les* – množina zakorenených stromov. Konkrétnou implementáciou potom býva pole objektov – vrcholov. Ku každému objektu sa musí udržiavať smerník $p(x)$ na otca v strome. Smerník zástupcu množiny ukazuje na hodnotu `NULL`.

Operácia *makeset* (x) teda vytvorí nový prvok x a nastaví $p(x) =$ `NULL`.

Operáciu *find* (x) vykonáme tak, že budeme sledovať cestu po smerníkoch, až kým nenájdeme zástupcu.

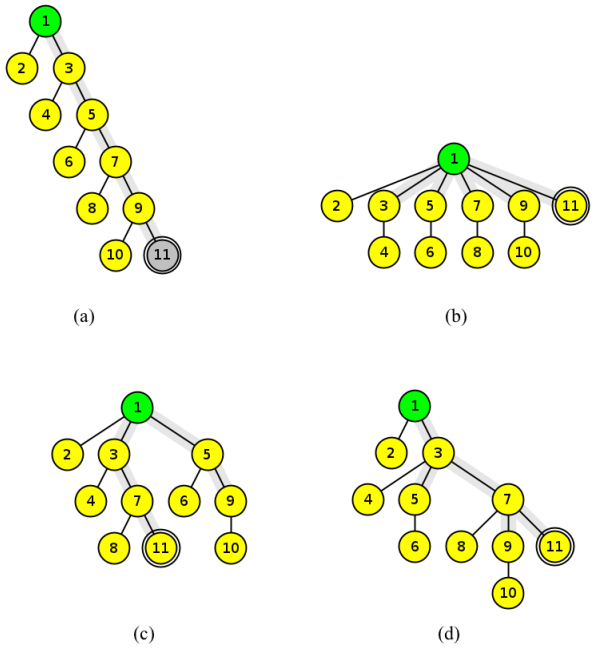
Operáciu *union* (x,y) ide najjednoduchšie vykonať tak, že presmerujeme smerník $p(y)$ na prvok x, teda $p(y) = x$. Môžeme ľahko pozorovať, že takýto *naivný* spôsob je neefektívny, lebo nám operácia *find* (x) v najhoršom prípade, na n prvkoch, trvá $O(n)$ krokov.

Použitie. Vďaka dvom hlavným operáciam *find* (x) a *union* (x,y) je táto dátová štruktúra známejšia pod pojmom *Union-Find*, ktorý používame aj my. Medzi najznámejšie problémy, ktoré sa riešia pomocou Union-Find patria Kruskalov algoritmus na nájdenie najlacnejšej kostry (Kruskal, 1956) a unifikácia (Knight, 1989). Veľmi priamočiare použitie je na zodpovedanie otázky „Koľko je komponentov súvislosti?“ alebo „Sú dva prvky v rovnakej množine?“ („Sú dva objekty navzájom prepojené?“), ak máme dovolené za behu pridávať hrany (spájať množiny objektov). Niektoré ďalšie grafové problémy popísal napr. Tarjan (1979).

Existujú dva prístupy ako zlepšiť operácie a tým aj zrýchliť ich vykonanie. Sú to: heuristika *spájanie podľa ranku* a rôzne heuristiky na *kompresiu cesty*.

Heuristika na spájanie. Prvá heuristika pridáva ku algoritmom hodnotu $rank(x)$, ktorá bude určovať najväčšiu možnú hĺbku podstromu zakorenenú vrcholom x. V tom prípade pri operácií *makeset* (x) zadefinujeme $rank(x) = 0$. Pri operácií *union* (x,y) vždy porovnáme $rank(x)$ a $rank(y)$, aby sme zistili, ktorý zástupca predstavuje menší strom. Smerník tohto zástupcu potom napojíme na zástupcu s vyšším rankom. Zástupca novej množiny bude ten s vyšším rankom. Ak sú oba ranky rovnaké, vyberieme ľubovoľného zo zástupcov x a y, jeho rank zvýšime o jeden a smerník ostatného zástupcu bude ukazovať na tohto zástupcu. Zástupcom novej množiny bude vybratý zástupca.

Heuristiky na kompresiu cesty. Druhou heuristikou je kompresia cesty. Algoritmov na efektívnu kompresiu cesty je veľa (Tarjan and van Leeuwen, 1984). Tu popíšeme tie najefektívnejšie. Prvou z nich je *jednoduchá kompresia cesty* (Hopcroft and Ullman, 1973). Pri vykonávaní operácie *find* (x), po tom, ako nájdeme zástupcu množiny obsahujúcej prvok x, smerníky prvkov navštívených po ceste (včetne x) presmerujeme na zástupcu množiny. Toto síce spomalí prvé vykonávanie, ale výrazne zrýchli ďalšie hľadania. Druhou heuristikou je *delenie cesty*



Obr. 1: *Kompresia cesty z vrchola 11 do koreňa.* Cesta je vyznačená šedou. (a) Pred vykonaním kompresie. Pri jednoduchej kompresii (b) sa všetky vrcholy sa napoja na zástupcu. Pri delení cesty (c) a pólení cesty (d) sa cesta skráti približne na polovicu.

(Leeuwen and Weide, 1977). Pri vykonávaní operácie $find(x)$ pripojíme každý vrchol[1] v ceste od vrcholu x po koreň stromu na otca jeho otca. Treťou heuristikou je *pólenie cesty* (Leeuwen and Weide, 1977). Pri vykonávaní operácie $find(x)$ pripojíme každý druhý vrchol[2] v ceste od vrcholu x po koreň stromu na otca jeho otca.

Zdá sa, že najefektívnejšie je pólenie cesty pred delením, ktoré použije zhruba dvakrát viac priradení smerníkov a jednoduchou kompresiou, ktorá vyžaduje dva behy (Galil and Italiano, 1991).

Časová zložitosť. Časová zložitosť Union-Find záleží od toho, koľko prvkov je v množinách a koľko je operácií celkovo vykonaných operácií. Počet prvkov označme n a počet operácií m. V praxi je zvyčajne počet operácií oveľa väčší ako počet prvkov. Všetky uvedené spôsoby ako vykonať operáciu $find(x)$ sa dajú použiť s obomi realizáciami operácie $union(x,y)$. V tabuľke 1 je porovnanie časových zložitostí (Tarjan and van Leeuwen, 1984).

[1]Okrem koreňa a synov koreňa, keďže tie deda a otca resp. deda nemajú.

[2]Okrem koreňa a synov koreňa, keďže tie deda a otca resp. deda nemajú.

	Naivné spájanie	Spájanie podľa ranku
Naivné hľadanie	$\Theta(mn)$	$\Theta(m \log n)$
Jednoduchá kompresia, delenie cesty, pólenie cesty	$\Theta\left(m \log_{1+m/n} n\right)$	$\Theta(m\alpha(m,n))$

(a) Prehľad časových zložitostí, ak $m \geq n$.

	Naivné spájanie	Spájanie podľa ranku
Naivné hľadanie	$\Theta(mn)$	$\Theta(n+m \log n)$
Jednoduchá kompresia	$\Theta(n+m \log n)$	$\Theta(n+m\alpha(n,n))$
Delenie cesty	$\Theta(n \log m)$	$\Theta(n+m\alpha(n,n))$
Pólenie cesty	$\Omega(n+m \log n)$, $O(n \log m)$	$\Theta(n+m\alpha(n,n))$

(b) Prehľad časových zložitostí, ak $m < n$.

Tabuľka 1: Porovnanie časových zložitostí pre rôzne kombinácie hľadaní prvkov a spájaní množín pre Union-Find. Počet prvkov je n a počet operácií je m. α je inverzná ackermannová funkcia. V praxi zväčša platí, že $m > n$.

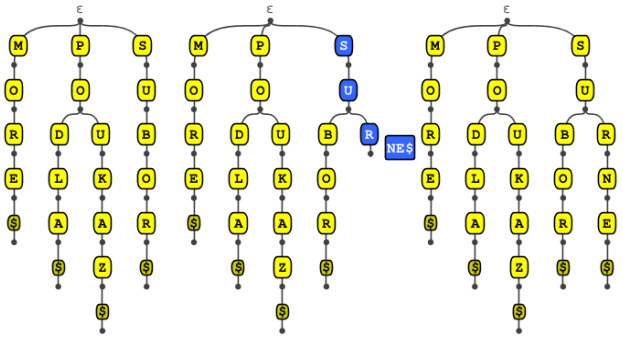
6 Písmenkový strom

Písmenkový strom je *zakorenený strom*, v ktorom každá hrana obsahuje práve jeden znak z abecedy alebo *ukončovací znak*. *Ukončovací znak* je ľubovoľný, dopredu dohodnutý symbol, ktorý sa v abecede nenachádza. My používame ako abecedu veľké znaky anglickej abecedy a ukončovací znak značíme dolárom (\$).

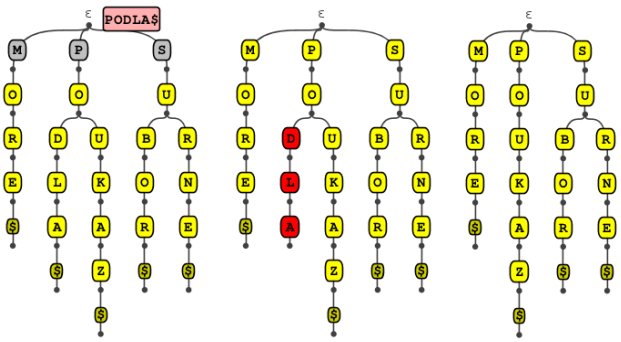
Popis. Strom obsahuje slová. Po prejdení cesty z koreňa do vrcholu s *ukončovacím znakom* prečítame slovo.[3] Teda, oproti binárnym vyhľadávacím stromom je hlavný rozdiel v tom, že kľúče nie sú uložené vo vrcholoch, ale samotná poloha v strome určuje kľúč (slovo). Písmenkový strom je podobne ako binárny vyhľadávací strom je *asociatívne pole (slovník)*, takže poskytuje tieto tri operácie:

- **insert**(w) – pridá do stromu slovo w;
- **find**(w) – zistí, či sa v strom slovo w nachádza;

[3]Na hranách $e_1, e_2, \ldots, e_n$ sú znaky $w_1, w_2, \ldots, w_{n-1}$,\$, ktoré po zreťazení utvoria slovo $w_1 w_2 \ldots w_{n-1}$.



Obr. 2: *Vloženie slova „*SURNE*“*. Začiatok slova „SU“ sa v strome nachádza, ale treba pripojiť hrany so znakmi R, N, E a $.



Obr. 3: *Odstránenie slova „*PODLA*“*. Po odstránení $ nám v strome ostane nepotrebá prípona „DLA“ (mŕtva vetva), ktorá je vyznačená červenou.

- **delete**(w) – odstráni zo stromu slovo w a prípadne vyrieši zmeny v strome.

Všetky operácie začínajú v koreni a ku slovu pridávajú ukončovací znak, teda pracujú s reťazcom $w\$$.

Operácia *insert*(w) vloží do stromu vstupný reťazec tak, že z reťazca berie znaky a prechádza po príslušných hranách. Ak hrana so znakom neexistuje, pridá ju.

Operácia *find*(w) sa spustí z koreňa podľa postupnosti znakov. Ak hrana, po ktorej sa má spustiť neexistuje, dané slovo sa v strome nenachádza. Ak prečíta celý vstupný reťazec, dané slovo sa v strome nachádza.

Operácia *delete*(w) najprv pomocou operácie *find*(w) zistí umiestnenie slova. Ak sa slovo v strome nachádza, algoritmus odstráni hranu s ukončovacím symbolom a vrchol, ktorý bol na nej zavesený. V tomto štádiu sa nám môže stať, že v strome ostane *mŕtva vetva* – nie je ukončená ukončovacím znakom. Pre fungovanie stromu to nevadí, všetky operácie by prebiehali správne, ale takto štruktúra zaberá zbytočne veľa miesta. Preto je dobré túto mŕtvu vetvu odstrániť.

Časová zložitosť. Všetky tri operácie majú časovú zložitosť $O(|w|)$, kde $|w|$ je dĺžka slova.

Použitie. Vďaka tomu, že písmenkový strom udržiava spoločné *prefixy* slov sa nazýva aj *prefixový strom*. Prvýkrát popísal písmenkový strom Fredkin (1960), ktorý používal názov *trie memory*, keďže išlo o spôsob udržiavania dát v pamäti. Pojem *trie*[4] sa rozšíril a používa sa celosvetovo.

O niečo neskôr Knuth (1973) uviedol vo svojej knihe ako príklad na písmenkový strom vreckový slovník. Knuth (1973) však ukázal len komprimovanie koncov vetiev. Písmenkový strom, v ktorom každý vrchol, ktorého otec má len jedného syna je zlúčený s otcom[5], popísal Morrison (1968) a zaviedol pre ňho pojem *PATRICIA* (*radix tree, resp. radix trie*). Využíva sa napríklad v *routovacích tabuľkách* (Sklower, 1991).

Pôvodný návrh (Fredkin, 1960) ako uložiť trie do pamäte zaberal príliš veľa nevyužitého priestoru. Liang (1983) popísal ako efektívne zmenšiť pamäťový priestor potrebný na uloženie trie. Nazval ho *packed trie* a popísal ako ho dobre použiť na slabikovanie slov. Systém bol následne použitý v programe TEX.

Písmenkové stromy sa podobajú na *konečné automaty*. Vznikli rôzne modifikácie stromov na automaty, ktorých hlavnou výhodou je, že v komprimovanej podobe spájajú nielen predpony, ale aj prípony slov a teda v slovách ľudských jazykov výrazne znižujú pamäťový priestor potrebný na uchovanie dátovej štruktúry. Vďaka tomu sa využívajú na jazykovú korekciu, automatické dopĺňanie slov a podobne (Appel and Jacobson, 1988; Lucchesi et al., 1992).

Priamočiare je použitie písmenkového stromu na utriedenie poľa slov. Všetky slová sa pridajú do stromu a potom sa spraví *preorderový prechod* stromu. Túto myšlienku spracovali Sinha and Zobel (2004) a veľmi výrazne zrýchlil triedenie dlhých zoznamov slov. Neskôr tento algoritmus vylepšili Sinha et al. (2006). Kvôli tomu, ako algoritmus pracuje, sa nazýva *burstsort*.

[4] Z anglického re*trie*val – získanie.

[5] Na hranách teda nie sú znaky, ale slová.

Špeciálnym použitím písmenkového stromu je vytvorenie stromu zo všetkých prípon slova. Táto dátova štruktúra sa nazýva *sufixový strom* a dá sa modifikovať na udržiavanie viacerých slov. Tieto štruktúry majú veľmi veľa praktických využití (Gusfield, 1997).

7 História

Každá vizualizovaná operácia (insert/delete/...) na dátovej štruktúre pozostáva z niekoľkých krokov. Jednou z noviniek v projekte je možnosť vrátiť sa pri prehliadani operácií o niekoľko krokov späť (história krokov), resp. vrátiť späť celé operácie (história operácií).

Niekedy sa stáva, že nedočkavý užívateľ rýchlo prekliká cez celú vizualizáciu operácie a pritom si nestihne uvedomiť, aké zmeny sa vykonali na danej dátovej štruktúre. Inokedy je operácia taká rozsiahla, že niektoré dôležité zmeny si nevšimne. Vtedy by bolo užitočné pozrieť si vizualizáciu ešte raz (alebo niekoľkokrát). Tento problém rieši história krokov. Užívateľ má možnosť vrátiť sa späť o jeden krok (tlačidlo „Späť“/„Previous“) alebo preskočiť na ľubovoľný krok po kliknutí na zodpovedajúci komentár.

História krokov a operácií je atomická. Krok/operácia sa vykoná/vráti celý(-á) alebo vôbec, pričom stav dátovej štruktúry korešponduje s pozíciou v histórii. To umožňuje po vrátení celej operácie vykonať inú operáciu. Táto vlastnosť je užitočná najmä v prípade vykonania operácie (prípadne zmazania celej dátovej štruktúry) omylom.

8 Záver

work in progress; co sme spravili - uz je v uvode?, preco sme lepsi - sme vobec lepsi (ako galles)?, co este chceme/treba spravit - maybe DONE, co je rozrobene - v podstate to, co chceme spravit - same as previous?
V ďalšej práci sa budeme zaoberať implementovaním ďalších vizualizácií dátových štruktúr (napríklad „tejto, tejto a aj tejto“), doplnením histórie krokov do všetkých dátových štruktúr, ale aj vylepšením GUI, refaktorovaním zdrojového kódu a inými softvérovými vylepšeniami. Našim cieľom je čo najviac zjednodušiť prácu s programom a tak zefektívniť výučbu jednotlivých dátových štruktúr, resp. spraviť ju zábavnejšou.

8.1 Príspevky autorov

Katka Kotrlová obohatila projekt o vizualizácie dnárnej, ľavicovej, skew a párovacej haldy, Viktor Tomkovič pridal vizualizácie union findu a písmenkového stromu, Tatiana Tóthová vizualizovala finger tree a Pavol Lukča dorobil históriu krokov a operácií do takmer všetkých slovníkov a venoval sa refaktorovaniu zdrojového kódu. Na príprave tohto textu sa podieľali všetci autori.

Poďakovanie

Autori by sa chceli poďakovať školiteľovi za veľa dobrých rád a odborné vedenie pri práci.

Literatúra

Aho, A. V. and Hopcroft, J. E. (1974). *The Design and Analysis of Computer Algorithms*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition.

Appel, A. and Jacobson, G. (1988). The world's fastest scrabble program. *Communications of the ACM*, 31(5):572–578.

Fredkin, E. (1960). Trie memory. *Commun. ACM*, 3(9):490–499.

Galil, Z. and Italiano, G. F. (1991). Data structures and algorithms for disjoint set union problems. *ACM Comput. Surv.*, 23(3):319–344.

Gusfield, D. (1997). *Algorithms on strings, trees, and sequences: computer science and computational biology*. Cambridge University Press, New York, NY, USA.

Hopcroft, J. E. and Ullman, J. D. (1973). Set merging algorithms. *SIAM J. Comput.*, 2(4):294–303.

Knight, K. (1989). Unification: a multidisciplinary survey. *ACM Comput. Surv.*, 21(1):93–124.

Knuth, D. E. (1973). *The Art of Computer Programming, Volume III: Sorting and Searching*. Addison-Wesley.

Kováč, J. (2007). Vyhľadávacie stromy a ich vizualizácia. Bakalárska práca.

Kruskal, J. B. (1956). On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 7(1):48–50.

Leeuwen, J. and Weide, T. v. d. (1977). Alternative path compression rules. Technical report, University of Utrecht, The Netherlands. An outline of the results were presented at the Fachtagung on Algorithms and Complexity Theory, Oberwolfach, Oct 1977.

Liang, F. (1983). *Word hy-phen-a-tion by com-puter*. PhD thesis, Stanford University, Stanford, CA 94305.

Lucchesi, C. L., Lucchesi, C. L., and Kowaltowski, T. (1992). Applications of finite automata representing large vocabularies.

Morrison, D. R. (1968). Patricia – practical algorithm to retrieve information coded in alphanumeric. *J. ACM*, 15(4):514–534.

Patwary, M., Blair, J., and Manne, F. (2010). Experiments on union-find algorithms for the disjoint-set data structure. *Experimental Algorithms*, pages 411–423.

Saraiya, P., Shaffer, C. A., McCrickard, D. S., and North, C. (2004). Effective features of algorithm visualizations. In *Proceedings of the 35th SIGCSE technical symposium on Computer science education*, SIGCSE '04, pages 382–386, New York, NY, USA. ACM.

Shaffer, C. A., Cooper, M. L., Alon, A. J. D., Akbar, M., Stewart, M., Ponce, S., and Edwards, S. H. (2010). Algorithm visualization: The state of the field. *Trans. Comput. Educ.*, 10:9:1–9:22.

Sinha, R., Ring, D., and Zobel, J. (2006). Cache-efficient string sorting using copying. *J. Exp. Algorithmics*, 11:1.2.

Sinha, R. and Zobel, J. (2004). Cache-conscious sorting of large sets of strings with dynamic tries. *J. Exp. Algorithmics*, 9.

Sklower, K. (1991). A tree-based packet routing table for berkeley unix. In *Proceedings of the Winter 1991 USENIX Conference*, pages 93–104.

Tarjan, R. E. (1979). Applications of path compression on balanced trees. *J. ACM*, 26(4):690–715.

Tarjan, R. E. and van Leeuwen, J. (1984). Worst-case analysis of set union algorithms. *J. ACM*, 31(2):245–281.

Yao, A. C. (1985). On the expected performance of path compression algorithms. *SIAM J. Comput.*, 14:129–133.