Napredni algoritmi i strukture podataka

Stabla, Merkle stabla, Merkle dokaz, Anti-entropy, Serijalizacija stabla

Univerzitet u Novom Sadu
Fakultet Tehničkih Nauka

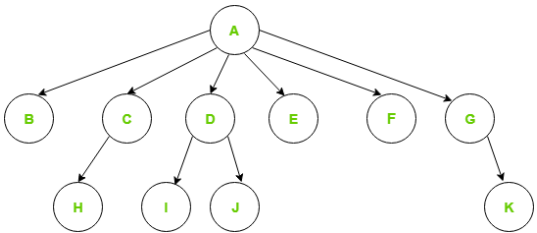
Strukture podataka - stablo, kratak podsetnik

- Stablo predstavlja čvorove povezane ivicama — prosto gledano
- U računarskima naukama, stablo je široko korišćen apstraktni tip podataka koji prikazuje hijerarhijsku strukturu podataka
- Stablo sadrži korenski element (root) i podstabla dece sa roditeljskim čvorom, predstavljenim kao skup povezanih čvorova
- Struktura podataka stabla se može definisati *rekurzivno* kao kolekcija čvorova, gde je svaki čvor struktura podataka koja se sastoji od vrednosti, i liste referenci na druge čvorove

- Stablo se sastoji od čvorova koji su u vezi roditelj/dete
- Tačno jedan čvor nema roditelja — korenski element (root)
- Svaki čvor ima najviše jednog roditelja — osim korenskog
- Čvor ima nula ili više dece
- Čvor može da bude bez dece — list
- Čvor stabla i njegovi potomci — Podstablo
- Visina stabla — najveća dubina stabla

N-arno stablo

- N-arno stablo — generičko stablo sa kolekcijom čvorova gde je svaki čvor struktura podataka koja se sastoji od zapisa, i liste referenci na svoje potomke (duplirane reference nisu dozvoljene)



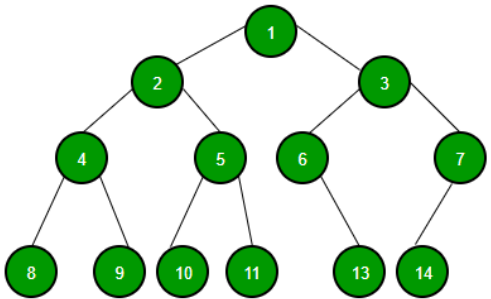
(Geeksforgeeks - Generic Trees(N-array Trees))

Pitanje 1

Kako porediti N-arna stabla :) ?

Binarno stablo

- Binarno stablo — stablo čiji elementi imaju najviše 2 deteta
- Pošto svaki element u binarnom stablu može imati samo 2 deteta, obično ih nazivamo *levo* i *desno* dete



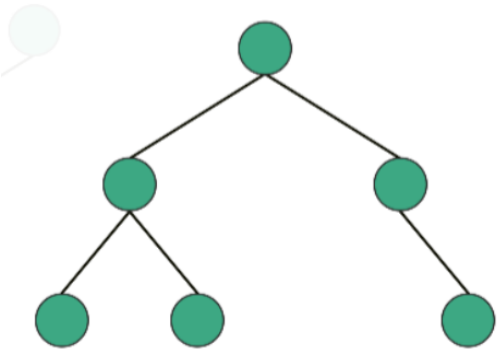
(Geeksforgeeks - Generic Trees(N-array Trees))

Pitanje 2

Kako porediti binarna stabla :) ?

Balansirano binarno stablo

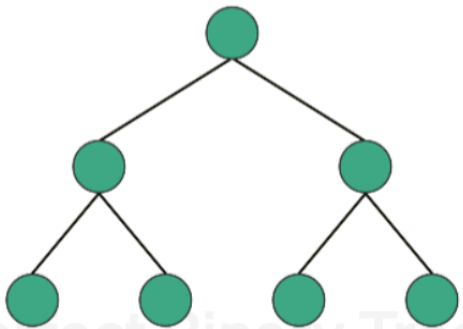
- Balansirano binarno stablo — uravnoteženo po visini
- Definiše se kao binarno stablo u kome se visina levog i desnog podstabla bilo kog čvora razlikuje za **najviše 1**



(Towards data science trees)

Kompletno binarno stablo

- Kompletno binarno stablo — stablo koje ima sve nivoe u potpunosti popunjene čvorovima osim poslednjeg nivoa
- Na poslednjem nivou, svi čvorovi su što je moguće levo



(Towards data science trees)

Pitanje 3

Kako formirati binarna/n-arna stabla :) ?

Pitanje 4

Kako obilaziti binarna/n-arna stabla :) ?

Problem 1

Zaposlili ste se u Dropbox-u (sweet), trebate da dodate funkcionanost provere integriteta podataka, da li ih slučajno Dropbox nije *oštetio* kada korisnik uradi *upload* podataka, i obriše ih sa svog računara. Pored toga, podaci se mogu nalaziti na različitim uredjajima, korisnik može da uradi izmene na jednom, a moramo da sinhronizujemo nedostajuće elemente. Ograničenja za funkcionalnost su:

- Ne potrošimo previše resursa, ako je to moguće
- Kroz mrežu ne saljemo same podatke — nikako nije isplativo
- Procesna moć nije ograničavajući faktor

Ideje :)?

Merkle stablo - uvod

- Merkle stablo ili **hash stablo** je stablo u kome je svaki čvor označen **hash** vrednošću
- Ova stabla omogućavaju efikasnu i bezbednu verifikaciju sadržaja velikih struktura podataka
- Merkle stablo je razvijeno 1979 godine, a 2002 je patent istekao (blago nama :))
- Ovo stablo je generalno **binarno** po prirodi
- Za razliku od uobičajenog postupka kod većine stabla, ovo stablo se formira od lista (dna) ka korenu (vrhu)

- Formalno gledamo, Merkle stabla uzimaju skup podataka $(x_1, \ldots, x_n)$ na ulaz
- Povratna vrednost je **Merkel root hash** $h = \mathrm{MHT}(x_1, \ldots, x_n)$
- MHT **collision-resistant hash funkcija**
- *Hash* funkcija je **collision-resistant hash funkcija** ako je teško pronaći dva ulaza koja *hash*-iraju isti izlaz
- Formalno, za ulaze a i b, $a \neq b$ ali $H(a) = H(b)$

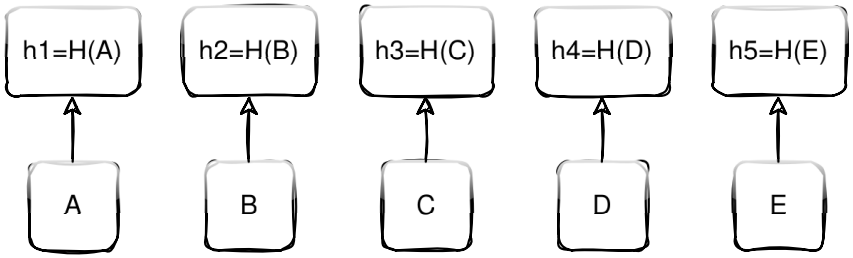
Merkle stablo - formiranje

- Algoritam za formiranje Merkle stabla je relativno jednostavan
- Merkle stablo ima **bottom-top** pristup, zbog svoje specifičnosti
- Formiranje stabla počinje od dna tj. konkretizovanih podataka – **data block**
- Polako idemo do vrha, gradeći **Merkle root** element
- Prvi element koji gradimo je **list**
- Svaki **data block** propustimo kroz *hash* funkciju, i tako formiramo prvi nivo – **list**

- Zatim, svaka **dva susedna** elementa grade **naredni nivo**
  - Propustimo njihove zajedničke *hash* vrednosti kroz *hash* funkciju
- Pošto radimo sa **binarnim** stablima, ako na nekom nivou **nemamo** odgovarajući čvor, možemo da dodamo *empty* elment da bi algoritam mogao da se nastavi
  - Prazan čvor kada propustimo kroz haš funkciju neće promeniti ostatak haša
  - Ovo znači da je ovakav čvor **neutralni** element za operaciju heširanja
- Kada propustimo poslednja dva čvora kroz hash funkciju dobijamo **Merkle root** element
- Time se algoritam za formiranje završava i formirali smo **Merkle stablo**
- Nadalje, stablo možemo da koristimo

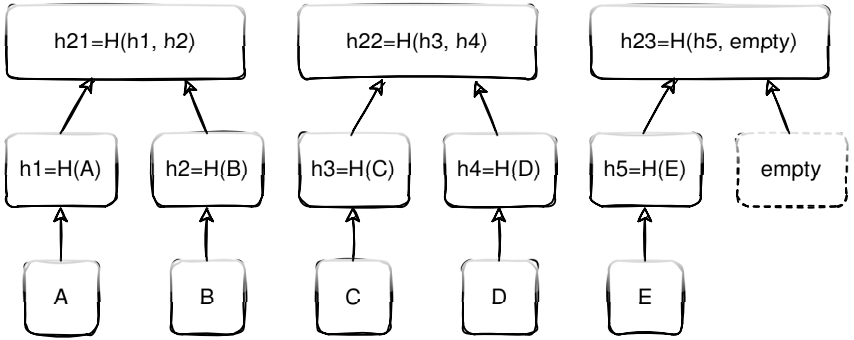
Merkle stablo - formiranje, primer

- Pretpostavimo da imamo 5 blokova podataka $\mathrm{b} = (A, ..., \mathrm{E})$
- Svaki podataka $\mathrm{b_i}$ propustimo kroz hash funckiju H i dobijamo njegov *hash*
- Dobijamo hash vrednost za prvi nivo $\mathrm{h_i} = \mathrm{H}(\mathrm{b_i}), \mathrm{b_i} = (A, ..., \mathrm{E})$
- H reprezentuje **collision-resistant hash** funkciju



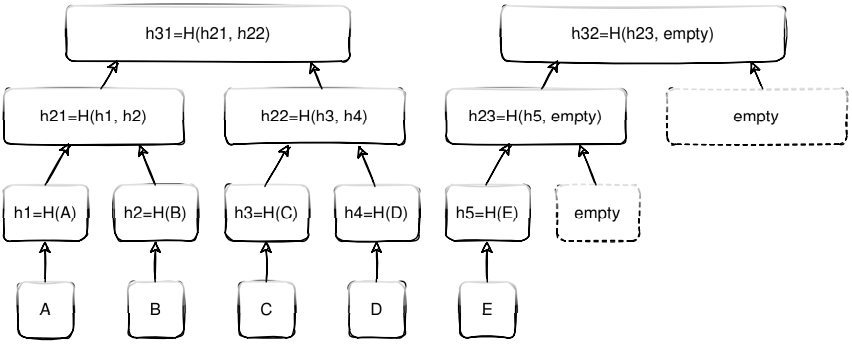
Merkle stablo - formiranje, primer

- Zabava se nastavlja u istom maniru, samo za naredne nivoe nam trebaju parovi :)
- Heširamo svaka dva susedna *hash-a*, da bi formirali sledeći nivo
  $h_{k,m} = H(h_i, h_{i+1})$
- Ako nam fali *hash*, da bi svako imao suseda :(, prosto napravimo prazan *hash* i nastavimo dalje (nećemo se stresirati oko gluposti)



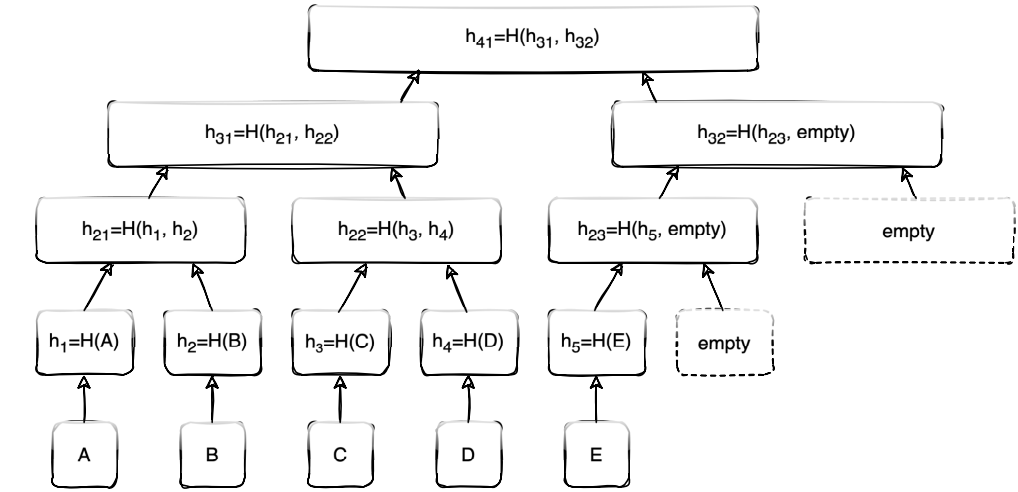
Merkle stablo - formiranje, primer

- Zabava se nastavlja isto kao i prethodno :)



Merkel stablo - formiranje, primer

Idemo isto... i dobijamo $h_{41} = H(h_{31}, h_{32})$



Merkle stablo - napomena

- Ono što smo deobili na kraju h_{41} je **Merkle root hash**
- Obratiti pažnju da svaki čvor u stablu čuva **hash** vrednost, **ne** i konkretan podatak
- Listovi čuvaju hash vrednost (blokova) podataka $h_i = (h_1, ..., h_5)$
- Čvorovi koji nisu listovi, i nisu **Merkle root hash**, čuvaju *hash* vrednost svoje dece — **internal node**

- Ako nam na nekom nivou fali par za neki element, prosto dodamo **prazan hash** da bi formirali par
- Može se lako generalizovati i izražunati Merkle stablo za bilo koji broj n podataka
- Formalno zapisano, prethodni primer se može zapisati kao $h_{41} = MHT(b_A, ..., b_E)$
- Merkel stabla se formiraju rekurzivno, od dna ka vrhu
- **Ovaj proces može biti procesno zahtevan!**
- To nikada nemojte izgubiti iz vida kada rešite ili morate da koristitite ovu strukturu podataka!
- Stoga upotreba ove strukture je za vrlo specifične zahteve
- Informacije o prodavnici računara :), nećete čuvatu u Merkle stablu

Merkle stabla - upotreba

- Merkle stabla se dosta koriste kod validacije podataka na različitim mestima
- Šta je potrebno da se sinhrnozuje, Merkle stablo može da nam kaže **bez otkrivanja konkretnih podataka**
- Danas se dosta koristi, i uglavnom se vezuje za *Blokchain* tehnologije :(
- **Merkle stabla** $\neq$ **Blokchain**
- Merkel stabo nije jedino upotrebljeno za Blokchain
- Merkel stablo nije smišljeno za *Blokchain*
- Ali jeste osnova *Blokchain* tehnologije
- Pogledajte koliko Blochain troši struje, pa će vam biti jasna konstatacija — *Ovaj proces može biti procesno zahtevan!*

Pitanje 5

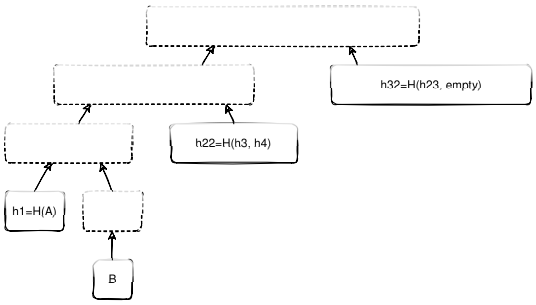
Zašto formiramo stablo, zar ne bi bilo jednostavnije da formiramo lanac, možda možemo izbeći rekurzije...

Ideje :)?

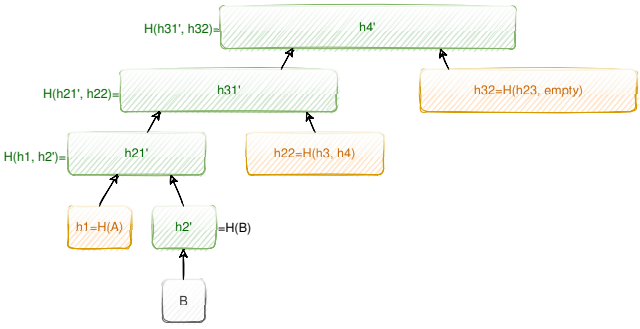
Merkel dokaz

- Ako bi formirali *hash-eve* kao lanac, vrlo je moguće da bi utrošili manje resursa
- Proces bi verovatno bio znatno jednostavniji, rekurzije mogu biti nezgodne
- **ALI** taj proces ima jednu nezgodnu osobinu — manu
- Ako bi trebali da proverimo integritet podataka, ili da li podataka pripada nekom skupu morali bi da sačuvamo/poredimo **kompletan** skup
- Ako su nam podaci na više čvorova, to znači da bi morali da prebacujemo ceo skup podataka kroz mrežu
- U najmanju ruku, to nije lepo i nije kulturno :)
- Zato se (binarno) stablo pokazalo boljim izborom

- Ako se vratimo na problem integriteta podataka koji su prebačeni negde na skladištenje (npr. Dropbox)
- Ključna ideja je da, nakon što preuzmemo blok b_i, tražimo mali deo Merkle stabla — **Merkle dokaz**
- **Merkle dokaz** nam omogućava da proverimo da li preuzeti blok b_i nije slučajno ili zlonamerno izmenjen
- Ako imamo podatak B, zanima nas da li je on deo većeg skupa podataka



- Da bi to odredili, treba nam samo mali deo Merkle stabla, da bi formirali Merkle root
- h_2' možemo izračunati propuštajući podatak kroz *hash* funkciju
- Delovi koji nam trebaju su $h1, h_{2,2}, h_{3,2}$
- Sa ovim delovima možemo stići do **Merkle root-a**
- Ova ideja se dosta koristi kod Torrent sistema



- Merkle dokaz pokušava da nam kaže da li podatak **pripada Merkle stablu ili ne**
- Da se nedvosmisleno dokaže valjanost podataka koji su deo skupa podataka, bez skladištenja celog skupa podataka i dobacivanja kroz mrežu
- Da bi se osiguralo da je skup podataka deo većeg skup, a bez otkrivanja kompletnog skupa podataka ili njegovog podskupa
- S obzirom na to da su jednosmerne *hash* funkcije namenjene da budu algoritmi bez kolizija, dva *hash-a* ne mogu da budu ista
- Ove osobine mogu biti primamljive za razne tipove aplikacija (ne samo *Blokchain*)

Problem 2

Zaposlili ste se u Amazonu (lepo), razvijate nov sistem za skladištenje podataka i od vas se očekuje da razvijete sistem za efikasnu verifikaciju sadržaja velkih skupova podataka na nekoliko čvorova. Cilj je da ustanovimo da li je došlo do divergencije nad replikama, i da ih singronizujemo bez poredjenja samih podataka. Pred vama su sledeća ograničenja:

- Ne potrošimo previše resursa za poredjenje, ako je moguće
- Kroz mrežu ne saljemo same podatke — nikako nije isplativo
- Proces poredjenja uradimo što je brže moguće

Ideje :)?

Anty-entropy - ideja

- Merkle stabla se mogu koristiti za sinhronizaciju podataka i proveru ispravnosti kopija u sistemima sa više čvorova (peers) u distribuiranom sistemu
- Ne moramo da poredimo čitave podatke da bismo shvatili šta se promenilo
- Možemo samo da uporediti *hash* stabala
- Kada shvatimo koji listovi su promenjeni, odgovarajući komad podataka može da se pošalje preko mreže i sinhronizuje na svim čvorovima — znatno jednostavnije
- Ova ideja se dosta koristi kod velikih sistema za skladištenje podataka (Amazon DynamoDB, Cassandra, ScylaDB, ...)

Anty-entropy - algoritam

- Algritam je relativno jednostavan i odvija se u tri koraka
  1. Napraviti Merkle stablo za svaku repliku (čvor) koja čuva kopiju podataka
  2. Uporedite Merkle stablo da bi otkrili razlike
  3. Razmenite šta je potrebno od selova podataka da svi imaju isti skup kopija
- Izgradnja Merkle stabla je resursno **intenzivna operacija**, opterećuje disk I/O i koristi dosta memorije :(
- Time plaćamo manje slanje podataka krož mrežu — **Nema besplatnog ručka**
- Ovaj proces se često odbija u pozadini, da ne bi blokirali ostatak sistema

- Provera kreće od vrha stabla, ako je *root hash* identičan, nema potrebe za popravkama
- Ako to nije slučaj, prelazimo na **levo dete**, zatim na **desno dete** — obilazimo stablo
- Postupak se nastavlja dok ne stignemo do bilo kakve razlike u podacima
- Kada ustanovimo šta je različito, samo taj deo skupa podataka treba da se popravi — pošalje kroz mrežu
- Kreće proces razmene podataka
- Odgovor na pitanje svih pitanja: **Ne, nećete razmenjivati podatke sa drugim čvorovima/replikama za projekat. Ali formiraćete Merkle stablo vaših podataka** :)

Pitanje 5

Ako imamo formirano binarno stablo (Merkle ili ne), kako ćemo ga serijalizovati/zapisati u datoteku...

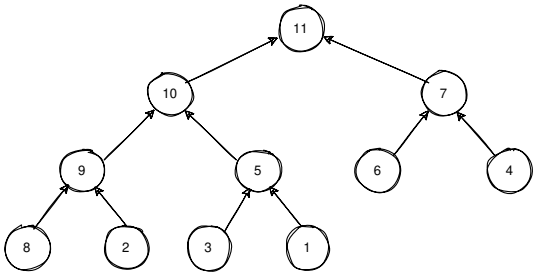
Ideje :)?

Serijalizacija stabla

- U nekim situacijama, treba da zapišemo stablo u fajl i da kasnije radimo nešto sa njim
- Idealan primer nam je **Anty-entropy**, kasnije moramo da poredimo stabla da vidimo razlike i prebacujemo podatke kroz mrežu
- Postoji dosta načina kako bi mogli da stablo zapišemo u fajl
- Pogledajte samo koliko ima tehnika obilazaka stabla

Serijalizacija stabla — jedan primer

- Ako imamo stablo kao sa slike
- Treba da idemo kroz njega, nekim od poznatih algoritama
- Jedna opcija je da idemo po nivoima:
  - [11 10 7 9 5 6 4 8 2 3 1]
- Treba voditi računa ako na nekom nivo imamo manjka elmenata, treba da zapišemo nekakav marker da nam bude jasan znak za kasnije!
- Ovo neće biti problem kod Merkle stabala, ali u opštem slučaju treba voditi računa



Dodatni materijali

- Merkle tree original paper
- Merkle tree easier paper
- Amazon Dynamo db paper
- Decentralized Thoughts
- Cassandra Manual repair: Anti-entropy repair
- Understanding Merkle Trees - Why Use Them, Who Uses Them, and How to Use Them
- Merkle tree and Golang

Pročitati za narednu sedmicu

- Dynamo: Amazon's Highly Available Key-value Store
- Cassandra - A Decentralized Structured Storage System