

Prügikoristus

"Reference-counting" prügikoristus

"Mark-sweep" ja "mark-compact" prügikoristus

"Copying" prügikoristus

Põlvkonniti prügikoristus

Prügikoristus

- **Prügikoristus** (**garbage collection**) vabastab automaatselt kuhjaobjektid, mida programm ei saa enam kasutada.
- Koosneb kahest osast:
 - elusate objektide ja prügi eristamisest (**garbage detection**);
 - prügi vabastamisest (**garbage reclamation**).
- **Elusus** (**liveness**) on globaalne semantiline omadus, mida üldjuhul pole võimalik täpselt kindlaks määrata.
- Prügikoristus kasutab ligikaudset kriteeriumit: objekt on elus, kui ta on "juurtest" (**root set**) lähtudes kättesaadav.

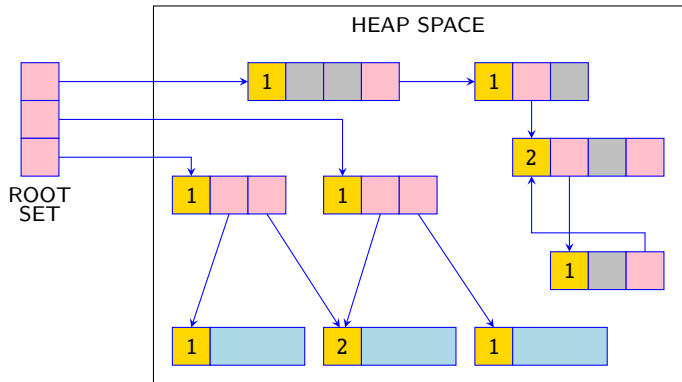
”Reference-counting” prügikoristus

”Reference-Counting”

- Iga objektiga seotakse loendur, mis näitab antud objektile viitavate viitade arvu.
- Loenduri muutmine toimub objektile viitade lisamisel/kustutamisel:
 - uue viida lisandumisel loendurit suurendatakse;
 - viida kustutamisel loendurit vähendatakse.
- Kui loendur on null, siis objekt vabastatakse:
 - vabastatud objekt lisatakse vabade objektide listi;
 - kõik viidad, kuhu see objekt viitas, kustutatakse.

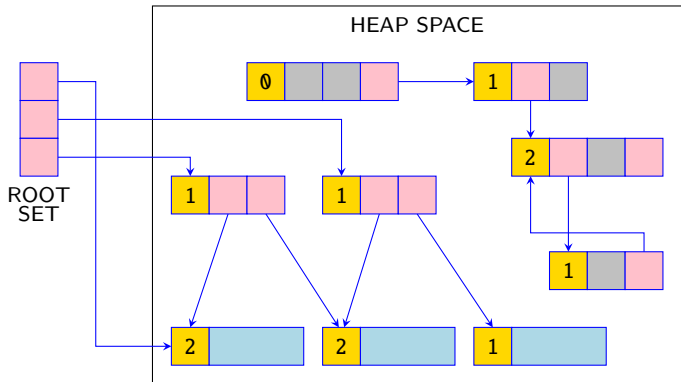
”Reference-counting” prügikoristus

Näide:



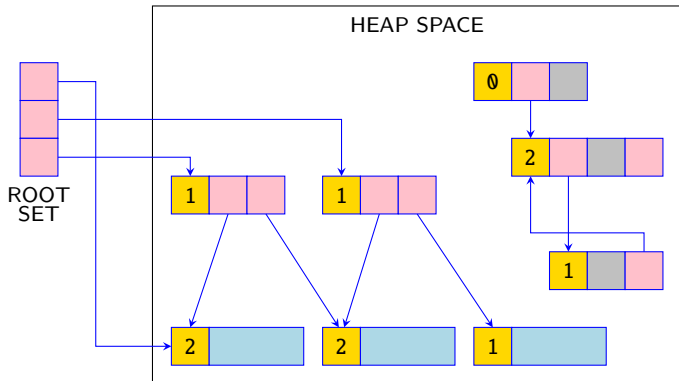
”Reference-counting” prügikoristus

Näide:



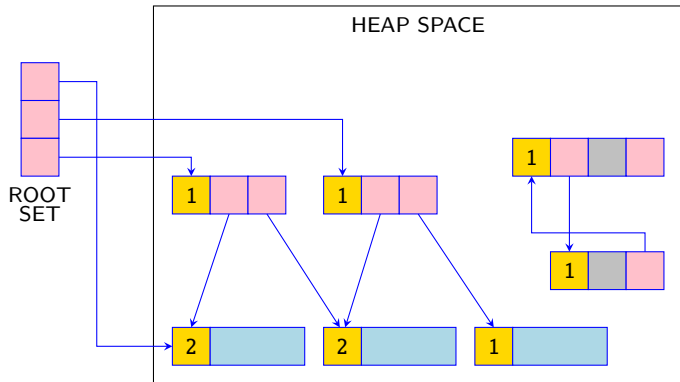
”Reference-counting” prügikoristus

Näide:



”Reference-counting” prügikoristus

Näide:



”Reference-counting” prügikoristus

Eelised

- ✓ on lihtne realiseerida;
- ✓ prügikoristusega seotud toimingud on hajutatud:
 - suhteliselt lihtsalt modifitseeritav inkrementaalseks;
- ✓ hea viitade lokaalsus:
 - muudetakse ainult lähte- ja sihtviitade loendureid;
- ✓ aeg objekti muutumisel prügiks ning tema vabastamise vahel (**zombie time**) on minimaalne;
- ✓ võimaldab lihtsasti realiseerida objektide ”finaliseerimist”.

”Reference-counting” prügikoristus

Puudused

- ✘ suhteliselt ebaefektiivne:
 - peab haldama loendureid isegi, kui prügi ei koristata;
- ✘ mälu fragmenteerumine:
 - analoogne teiste vabade objektide listil baseeruvate skeemidega;
- ✘ paljude väikeste objektide korral võib loendurite peale kuluda suhteliselt palju mälu;
- ✘ rekursiivne vabastamine on halvimal juhul tõkestatud kuhja suurusega;
- ✘ ei suuda vabastada kogu prügi:
 - tsüklilised andmestruktuurid.

”Mark-sweep” prügikoristus

”Mark-Sweep”

Toimub kahes faasis:

- 1 lähtudes juurtest, märgendatakse kõik kättesaadavad objektid;
- 2 teostatakse kuhja täislabivaatus ning märgendamata objektid vabastatakse.

```
void gc () {  
    foreach x ∈ Roots do  
        mark (x);  
    end;  
    collect ();  
}
```

”Mark-sweep” prügikoristus

Protseduur mark()

- Märgeandab etteantud tipu ning seejärel rekursiivselt kõik kättesaadavad tipud.
- Rekursioon lõpeb, kui tipp on juba märgendatud või kui antud tipp sisaldab ainult baasväärtusi.

```
void mark (ref x) {  
    if (x→mark == 0) {  
        x→mark = 1;  
        foreach y ∈ sons(x) do  
            mark (y);  
        end;  
    }  
}
```

”Mark-sweep” prügikoristus

Protseduur collect()

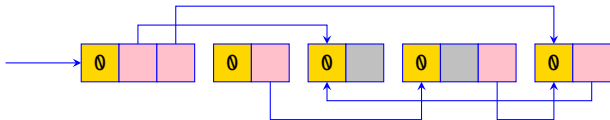
- Vaatab läbi kõik kuhjaobjektid ning lisab märgendamata objektid vabade objektide listi.

```
void collect () {  
    freelist = NIL;  
    foreach x ∈ objects() do  
        if (x→mark == 0) {  
            x→next = freelist;  
            freelist = x;  
        }  
        else x→mark = 0;  
    end;  
}
```

”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

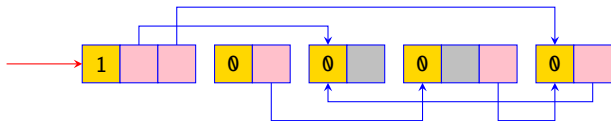
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

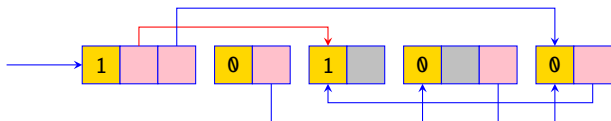
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

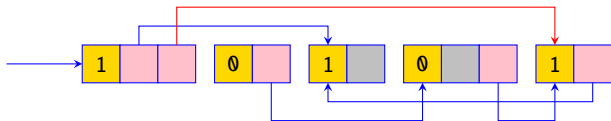
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

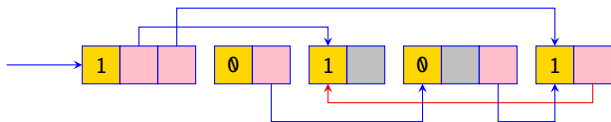
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



"Mark-sweep" prügikoristus

Näide:

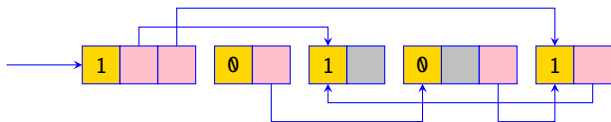
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

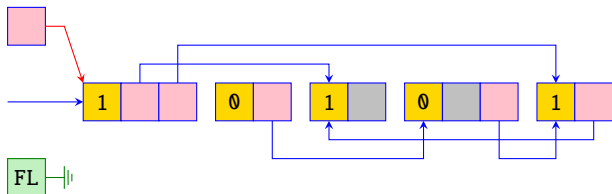
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

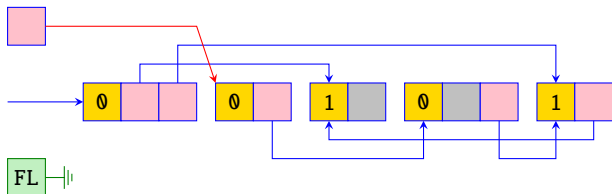
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

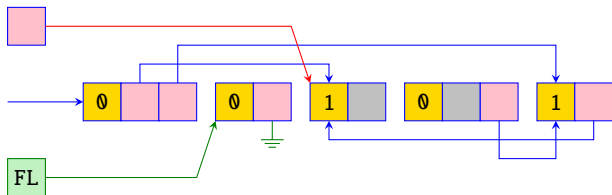
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



"Mark-sweep" prügikoristus

Näide:

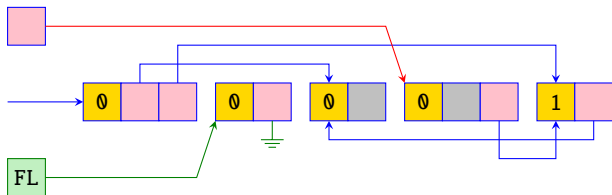
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



"Mark-sweep" prügikoristus

Näide:

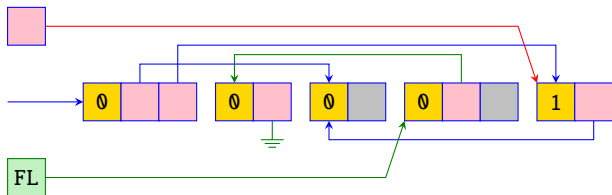
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

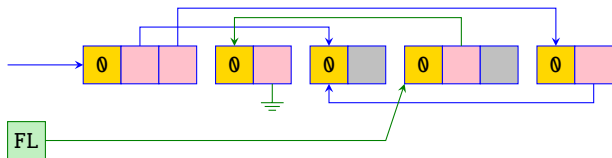
- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Näide:

- 1 Rekursiivne märkimine:
- 2 Objektide vabastamine:



”Mark-sweep” prügikoristus

Puudused

- ✘ Objektide märkimine toimub rekursiivselt.
 - Rekursioonimagasin kasvab halvimal juhul linearselt kuhja suurusega!!
 - Võimalik lahendus: Deutsch-Schorr-Waite'i ”viitade pööramise” ([pointer reversal](#)) algoritm.
- ✘ Elusad objektid on kuhjas vabade mälu piirkondadega segamini.
 - Mälu fragmenteerumine.
 - Võimalik lahendus: ”[mark-compact](#)” prügikoristus.

”Mark-compact” prügikoristus

”Mark-Compact”

Toimub kolmes faasis:

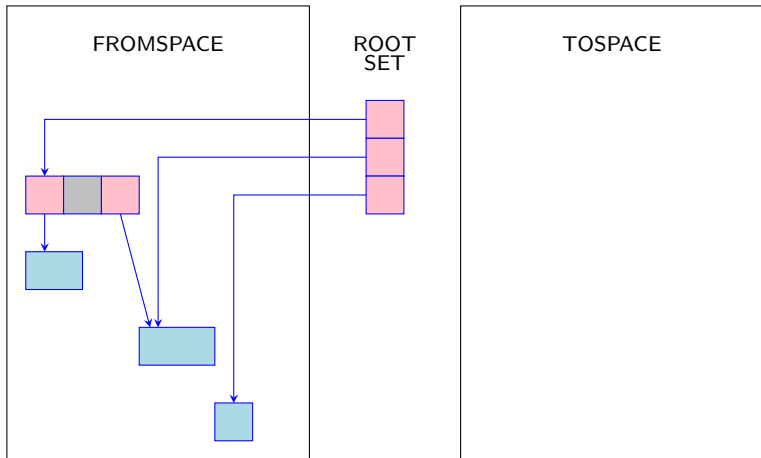
- 1 lähtudes juurtest, märgendatakse kõik kättesaadavad objektid (analoogselt ”mark-sweep” prügikoristusega);
 - 2 teostatakse kuhja täisläbivaatus ning arvutatakse märgendatud objektide uued aadressid;
 - 3 nihutatakse märgendatud objektide uude asukohta ning viitadele antakse uued väärtused.
- ✓ Prügikoristuse tulemusena paikneb kogu vaba mälu kompaktselt kuhja lõpus.
- ✗ On suhteliselt aeglane, kuna kuhjaobjekte tuleb läbida palju kordi.

”Copying” prügikoristus

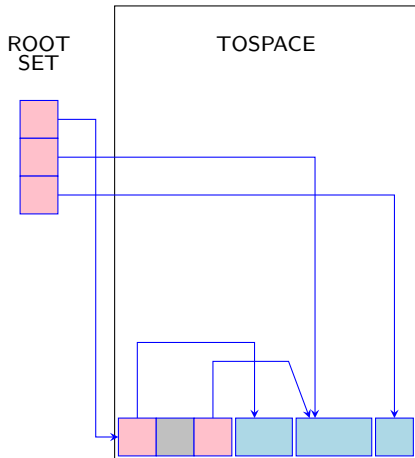
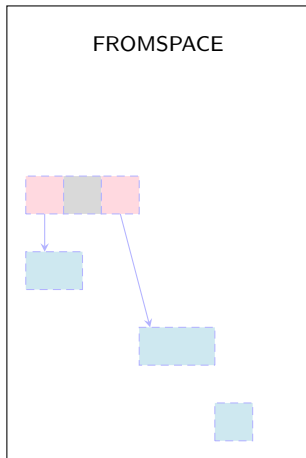
”Copying”

- Kuhi jagatud kaheks võrdseks alampiirkonnaks: `FromSpace` ja `ToSpace`.
- `FromSpace` on aktiivselt kasutatav mälupiirkond, kuhu salvestatakse uued objektid.
- Kui `FromSpace` saab täis, siis teostatakse prügikoristus:
 - elusad objektid kopeeritakse `FromSpace`'ist `ToSpace`'i;
 - `FromSpace` ja `ToSpace` vahetavad rollid (so. endine `ToSpace` muutub `FromSpace`'iks ja vastupidi).

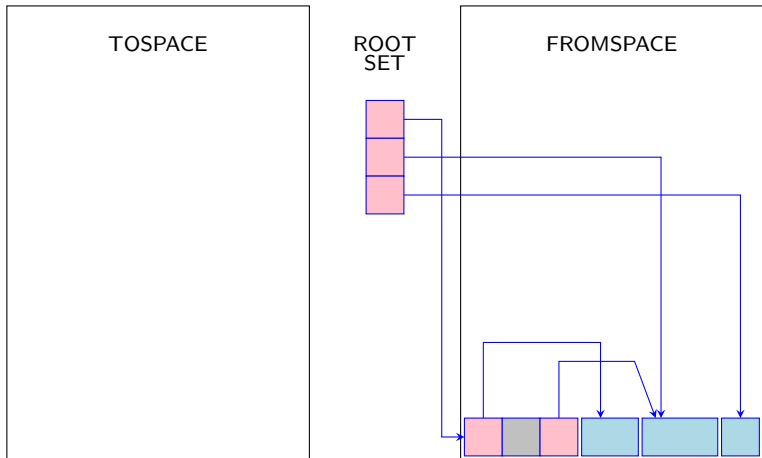
"Copying" prügikoristus



"Copying" prügikoristus



"Copying" prügikoristus



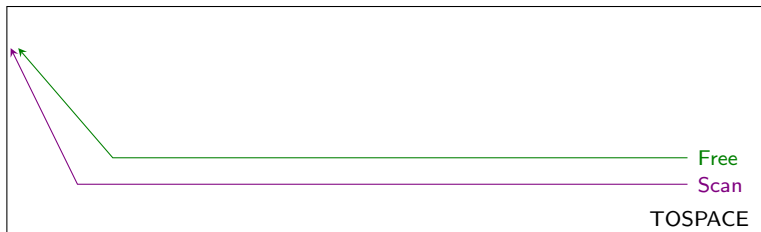
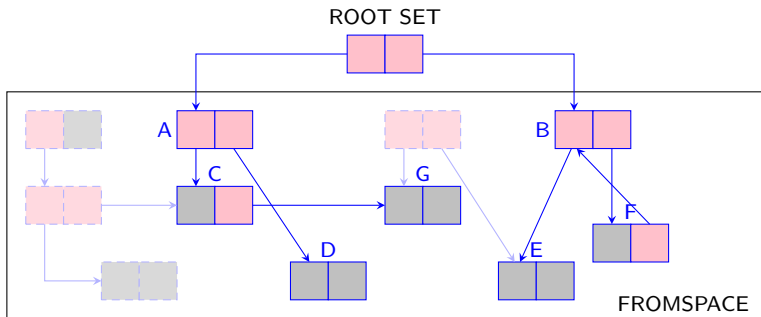
"Copying" prügikoristus

Cheney algoritm

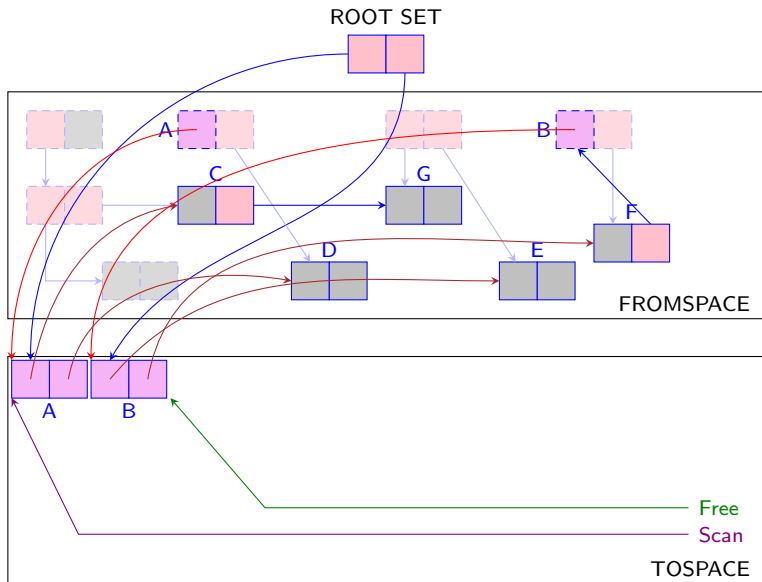
Toimub kahes (üksteisega vahelduvas) faasis:

- esimese faasis (**evacuate**) kopeeritakse vahetult kättesaadavad objektid **FromSpace**'ist **ToSpace**'i, kasutatud viidad asendatakse viitadega vastavatele uutele objektidele ning vanade objektide asemele installeeritakse "*edasi toimetamise*" viidad (**forwarding pointers**);
- teises faasis (**scavenge**) skaneeritakse **ToSpace**'i kopeeritud objektid lineaarselt läbi ning kõik **FromSpace**'ist vahetult kättesaadavad objektid evakueeritakse **ToSpace**'i; kui evakueeritav objekt on juba varem kopeeritud, siis objekti uuesti ei kopeerita, vaid asendatakse järgitav viit selle "*edasi toimetamise*" viidaga;
- protsess lõpeb, kui skaneerimisviit jõuab järele kuhja täitumisviidale.

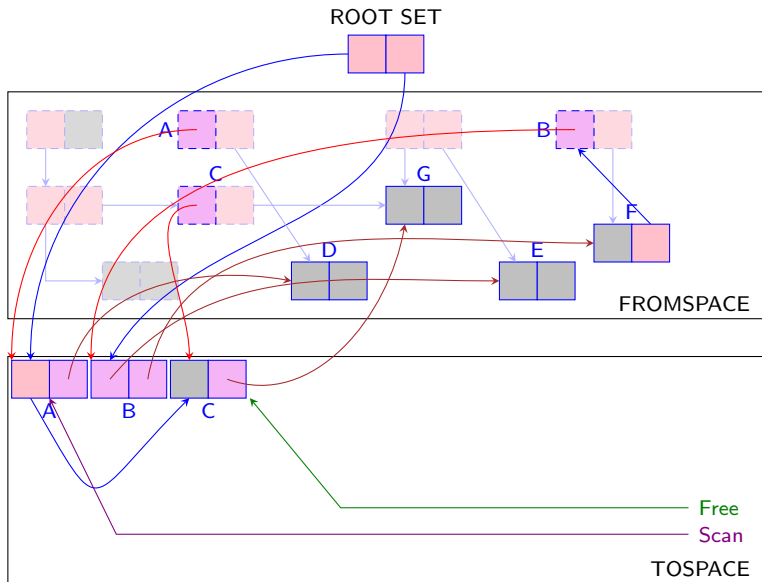
"Copying" prügikoristus



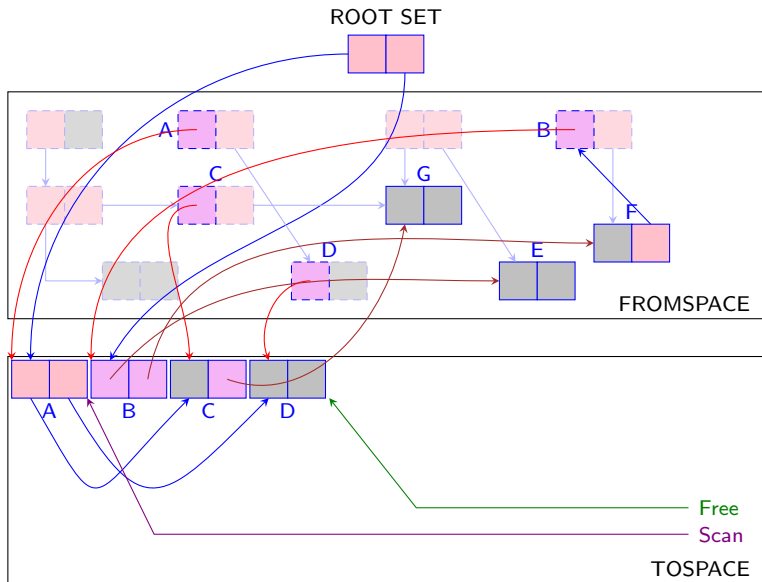
"Copying" prügikoristus



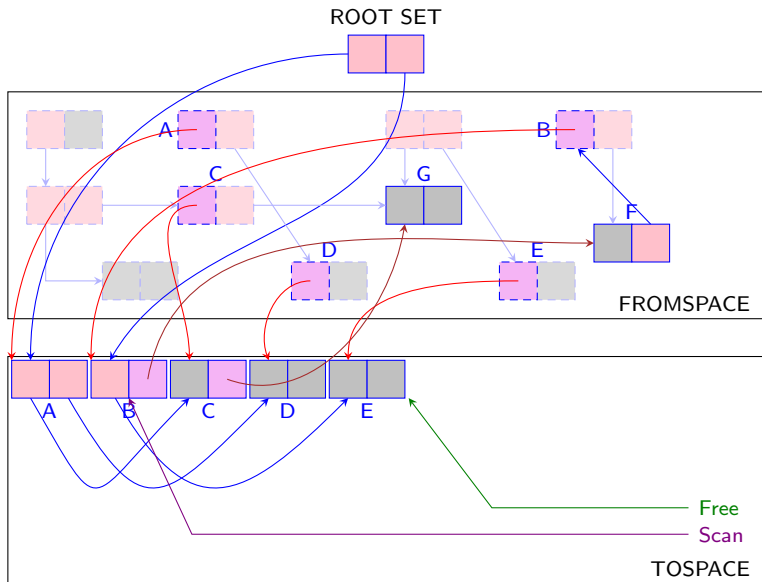
"Copying" prügikoristus



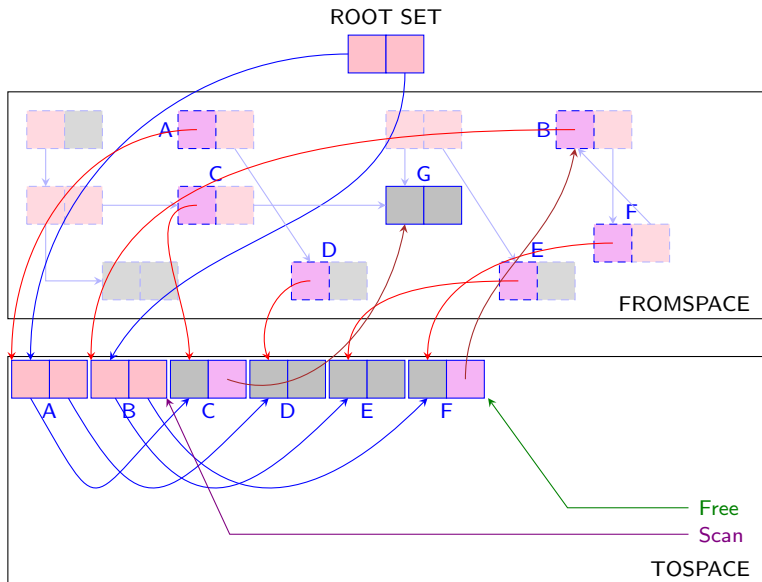
"Copying" prügikoristus



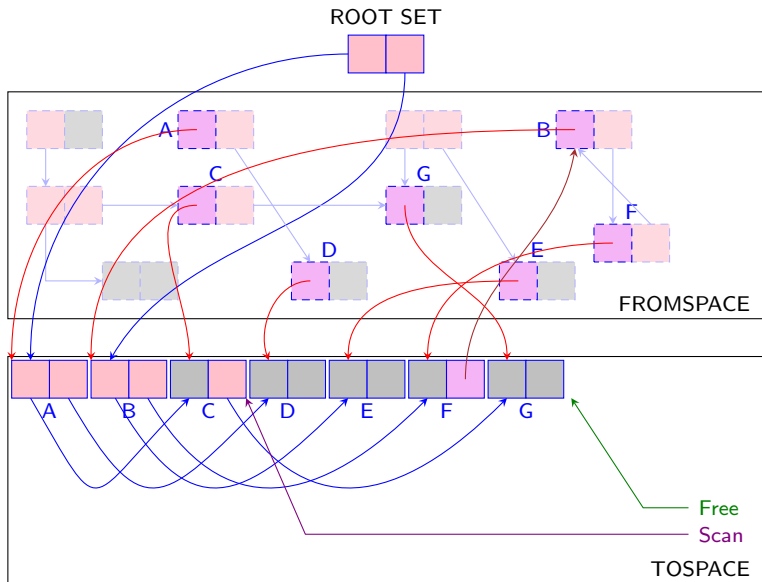
"Copying" prügikoristus



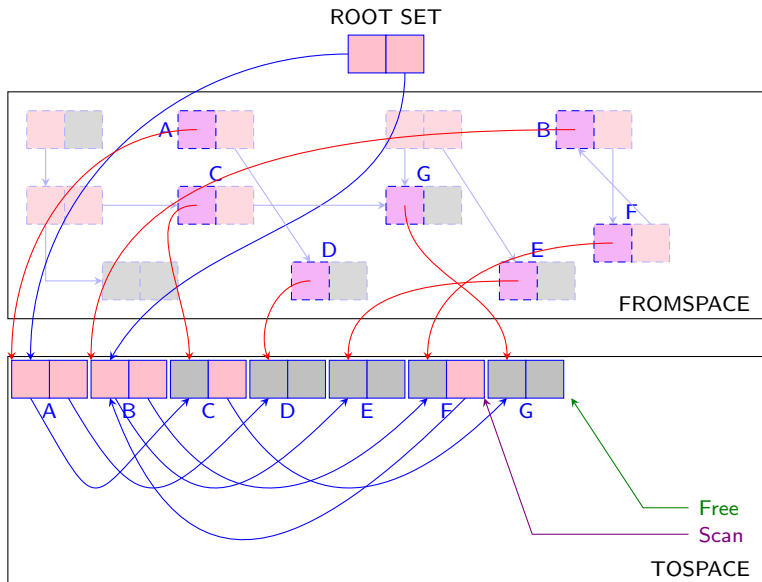
"Copying" prügikoristus



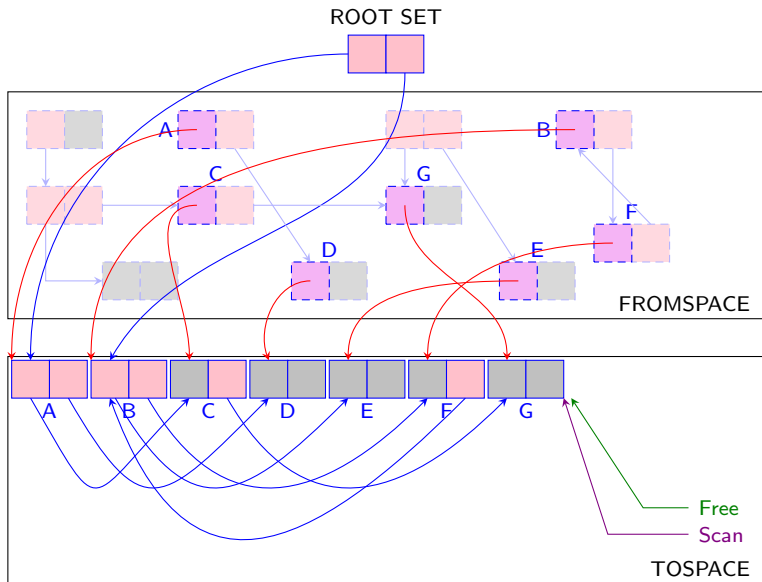
"Copying" prügikoristus



"Copying" prügikoristus



"Copying" prügikoristus



"Copying" prügikoristus

Eelised

- ✓ kogu vaba mälu on kompaktselt koos;
- ✓ suvalise suurusega uute objektide loomine on väga odav:
 - mälu reserveerimine on kuhja täitumisviida suurendamine;
 - kuhja täitumise kontroll on kahe viida võrdlemine;
- ✓ inspekteeritakse ainult elusaid objekte:
 - enamus objekte on reeglina suhteliselt lühikese elueaga;
 - elusaid objekte on seetõttu tavaliselt tunduvalt vähem kui prügi;
- ✓ teoreetiline amortiseeritud efektiivsus väga hea:
 - kuhja suuruse kasvades lähenevad kopeerimiskulud nullile!

”Copying” prügikoristus

Puudused

- ✘ kogu töö on kontsentreeritud prügikoristuse ajale:
 - võib tekitada häirivaid pause;
- ✘ laiuti läbivaatus võib segamini lüüa lokaalsusmustrid;
- ✘ kõik viidad tõstetakse ringi:
 - võib rikkuda mõnd invarianti, mida programm eeldab;
- ✘ pool mälust on ”kasutu”;
- ✘ pika elueaga objekte kopeeritakse igal prügikoristusel üha uuesti:
 - võib suurte ”veteranobjektide’ korral osutada küllaltki kulukaks.

Põlvkonniti prügikoristus

Empiirilisi tähelepanekuid

- **Vastsündinute suremus** (**infant mortality**) – enamik objekte sureb väga noorelt.
Reeglina 80-90% objekte sureb enne järgmise megabaidi kasutamist:
 - 60-90% CL ja 75-95% Haskell'i objektidest surevad enne saamist 10 kb vanaks.
 - SML/NJ vabastab 98% objektidest iga prügikoristuse järel.
 - 95% Java objektidest on "lühiealised".
- Mida vanem on objekt, seda tõenäolisemalt elab ta üle järgmise prügikoristuse.
- **Viitade suunatus** (**directionality of reference**) – nooremad objektid reeglina viitavad vanematele.

Põlvkonniti prügikoristus

Põlvkonniti prügikoristus

- Mälu on seal paiknevate objektid vanuse järgi jaotatud **põlvkondadeks** (**generations**).
- Põlvkondade koguarv ja suurus on reeglina eelnevalt fikseeritud.
- Uued objektid (**infants**) lisatakse noorimasse, "vastsündinute" (**nursery**), põlvkonda.
- Objekti vananedes (**tenure**) edutatakse ta järgmisse põlvkonda.
- Erinevates põlvkondades toimub prügikoristus erineva sagedusega
 - põhitähelepanu pööratakse noorimale põlvkonnale.

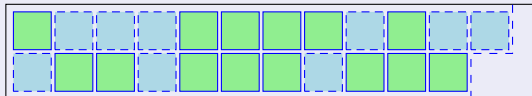
Põlvkonniti prügikoristus

Mälu jaotus põlvkondadeks

Generation 1 (youngest)

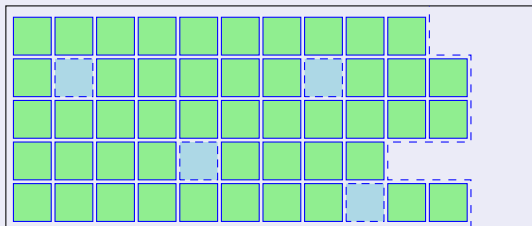


Generation 2



Generation n (oldest)

⋮



Live object



Dead object

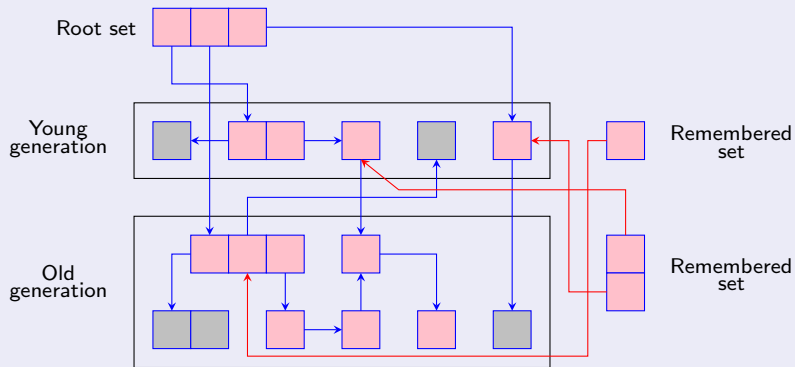
Põlvkonniti prügikoristus

Meelespead

- Lisaks "tavalistele" juurtele, on antud põlvkonna juurteks ka viidad teistest põlvkondadest temasse.
- Nende juurte asukoht pole staatiliselt kindlaksmääratav.
- Prügikoristuse aegne juurte otsimine teistest põlvkondadest on väga kulukas.
- Seetõttu seotakse iga põlvkonnaga **meelespea** (**remembered set**), mis sisaldab teistest põlvkondadest tulenevaid viitu
 - kui mingi viit on ühest põlvkonnast teise, siis lisatakse ta vastava sihtpõlvkonna meelespeasse.

Põlvkonniti prügikoristus

Meelespead



Põlvkonniti prügikoristus

Probleem

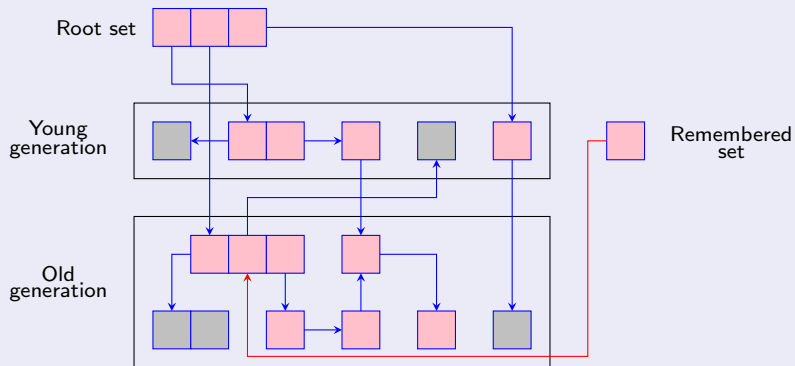
- Meelespeadele võib kuluda suhteliselt palju mälu
 - salvestada tuleb kõik põlvkondade vahelised sõltuvused.
- Meelespeasid peab haldama täitmisajal, mis võib olla väga kulukas
 - iga viitmuutuja omistamine võib potentsiaalselt olla erinevate põlvkondade vaheline.

Lahendus

- Salvestada meelespeades ainult viidad vanematest põlvkondadest noorematesse
 - kahe põlvkonna korral tarvis ainult üht meelespead (noorema põlvkonna jaoks).
- Kasutada ligikaudseid meelepeasid.

Põlvkonniti prügikoristus

Ühesuunalised meelepead



Põlvkonniti prügikoristus

Meelespead

- Viidad *vanemast põlvkonnast nooremasse* on noorema põlvkonna juurteks:
 - selliseid viitasid esineb suhteliselt harva;
 - nad tekivad vanas objektis viida destruktiivsel muutmisel;
 - selliseid omistamisi saab kindlaks teha kasutades **kirjutustõkkeid** (**write barrier**).
- Viidad *nooremast põlvkonnast vanemasse* on sagedased:
 - pole probleemiks, kui vanema põlvkonna prügikoristusel alati koristatakse ka noorem põlvkond.

Põlvkonniti prügikoristus

Põlvkonniti prügikoristus

- Tihti kasutatakse ainult kahte põlvkonda, kus noorem põlvkond on vanemast põlvkonnast väiksema suurusega.
- Reeglina toimub ainult **pisikoristus** (**minor collection**), kus:
 - eemaldatakse prügi ainult nooremast põlvkonnast;
 - piisavalt vanad objektid edutatakse vanemasse põlvkonda.
- Vanema põlvkonna täitumisel teostatakse **suurpuhastus** (**major collection**); so. eemaldatakse prügi mõlemast põlvkonnast.
- Pisikoristus ja suurpuhastus võivad kasutada erinevaid prügikoristuse skeeme (näit. pisikoristuse korral "copying" ning suurpuhastuse korral "mark-compact").

Põlvkonniti prügikoristus

Probleemid

- Pisikoristused ei eemalda vana põlvkonna prügi:
 - eakas prügi (tenured garbage) põhjustab ka nende noorte objektide säilimise, millele ta viitab (nepotism).
- Kui vana peab objekt olema enne järgmisse põlvkonda edutamist?
 - Üks pisikoristus pole piisav, kuna vahetult eelnevalt loodud objektidel pole olnud aega suremiseks.
 - Tavaliselt loetakse piisavaks kaks pisikoristust.
- Kui suur peab olema noorim põlvkond?
 - Peab ära mahtuma põhimällu.
 - Liiga suur teeb pisikoristuse pausid liiga pikaks.
 - Liiga väike ei anna noortele objektidele aega suremiseks.

Põlvkonniti prügikoristus

Põlvkonniti prügikoristuse eelised

- ✓ Väga edukas paljude rakenduste korral.
- ✓ Lühendab prügikoristuse pause interaktiivseteks rakendusteks talutavale tasemele.
- ✓ Heade lokaalsusomadustega.
- ✓ Reeglina vähendab prügikoristusele kuluvat koguaega.

Põlvkonniti prügikoristuse puudused

- ✗ Halvimal juhul on lihtsatest meetodidest kulukam.
- ✗ Objektid ei tarvitse surra piisavalt kiiresti.
- ✗ Rakendused võivad "takistuda" kirjutustõketesse.
- ✗ Liiga paljude viitade korral vanadest objektidest noortesse või väga sügava magasinini korral võib pauside kestus pikeneda.