Fakulteta za informacijske študije
Faculty of information studies

Kreativno jedro: Simulacije
Creative core: Simulations

Kampus šola HPC 2014

Vzporedni algoritmi

Matjaž Depolli
Odsek za komunikacijske sisteme
Inštitut „Jožef Stefan“

Naložba v vašo prihodnost
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA
Evropski sklad za regionalni razvoj

REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA IZOBRAŽEVANJE, ZNANOST IN ŠPORT

Pregled predavanja

- Flynnova taksonomija in tipi vzporednosti
- Pohitritev in učinkovitost
- Nivoji vporednosti v strojni opremi
- Izkoriščanje vzporednosti v programih
- Snovanje vzporednih algoritmov
  - Iskane lastnosti
  - Faze procesa snovanja

Flynnova taksonomija (1966)

- 4 skupine računalnikov:
  - SISD (Single Instruction Single Data)
  - SIMD (Single Instruction Multiple Data)
  - MISD (Multiple Instruction Single Data)
  - MIMD (Multiple Instruction Multiple Data)
- SISD = Von Neumannov model (zaporedni)
- Ostalo so paralelni modeli

Primeri

- SIMD:
  - GPU
  - Vektorske operacije (inštrukcije): MMX, SSE, ...
- MISD:
  - bi bili primerni za iskanje praštevil
  - Operacija 'sincos' na x86 arhitekturi
- MIMD
  - Superskalarna arhitektura
  - Multi- in many-core arhitekture
  - Lahko simulira SISD, SIMD in MIMD.

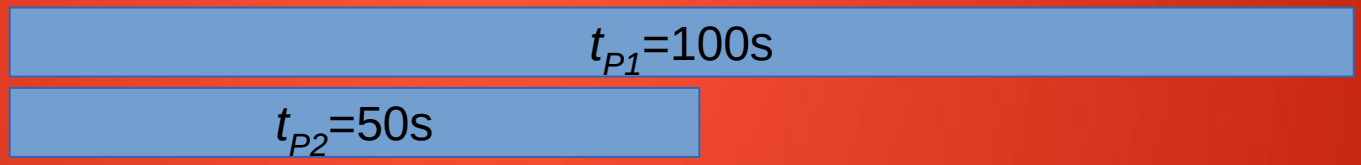
Tipi vzporednosti

- Podatkovna vzporednost
  - 'Data parallelism'
  - $F(X) = [F(x_1),F(x_2),F(x_3), \ldots, F(x_n)]$; pri $X = [x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n]$
  - Vsak od procesorjev dobi v izračun podmnožico vseh podatkov
- Postopkovna vzporednost
  - 'Task parallelism'
  - $F(X) = F_1(F_2(F_3(\ldots(F_n(X))\ldots)))$; pri $F = F_1 F_2 F_3 \ldots F_n$
  - Cevocod, procesor *i* dobi v izračun funkcijo F_i
- Asinhrona vzporednost in ostale eksotične oblike

Pohitritev in učinkovitost

- Pohitritev (speedup)
  - Pohitritev programa P1 v primerjavi s P2: $S = t_{p1}/t_{p2}$
  - Vzporedna pohitritev na *n* procesorjih: $S = t_1/t_n$
  - Primer: P1 rabi za izračun 10 s, P2 rabi za ekvivalenten izračun 5 s.

    t_{P1} = 10 s
    t_{P2} = 5 s
    $S = {}^{10}/_{5} = 2$



- Pohitritev vzporednega programa (absolutna) se vedno računa relativno na najhitrejši zaporedni algoritem
- Pohitritev je motivacija za paralelnost in za HPC

Pohitritev in učinkovitost

- Učinkovitost (efficiency) vzporednega algoritma na *n* procesorjih:
  - $E = S/n \ \ (= t_1/n*t_n)$
  - Prejšnji primer s tem da se P1 izvaja na enem procesorju, P2 pa na dveh:
    $E = 2/2 = 1$
- Učinkovitost 1 (pohitritev enaka *n*) je težko dosegljiva
  - Linearna pohitritev
- Učinkovitost nad 1 (pohitritev večja od *n*) je možna
  - Super-linearna pohitritev

V razmislek

- Najvišja pohitritev je odvisna od problema
  - Povsem zaporedni problemi (Newtonova metoda)
  - T.i. 'embarasingly parallel' problemi
- Teoretična in praktična pohitritev
- Odvisna je od računalnika
  - S čim primerjamo pohitritev na 200 jedrih GPUja?
- Lahko je delno naključna
  - Stohastični algoritmi, delno naključna izvedba na vzporednem računalniku
- Super-linearna pohitritev včasih nakazuje neoptimalen zaporedni algoritem

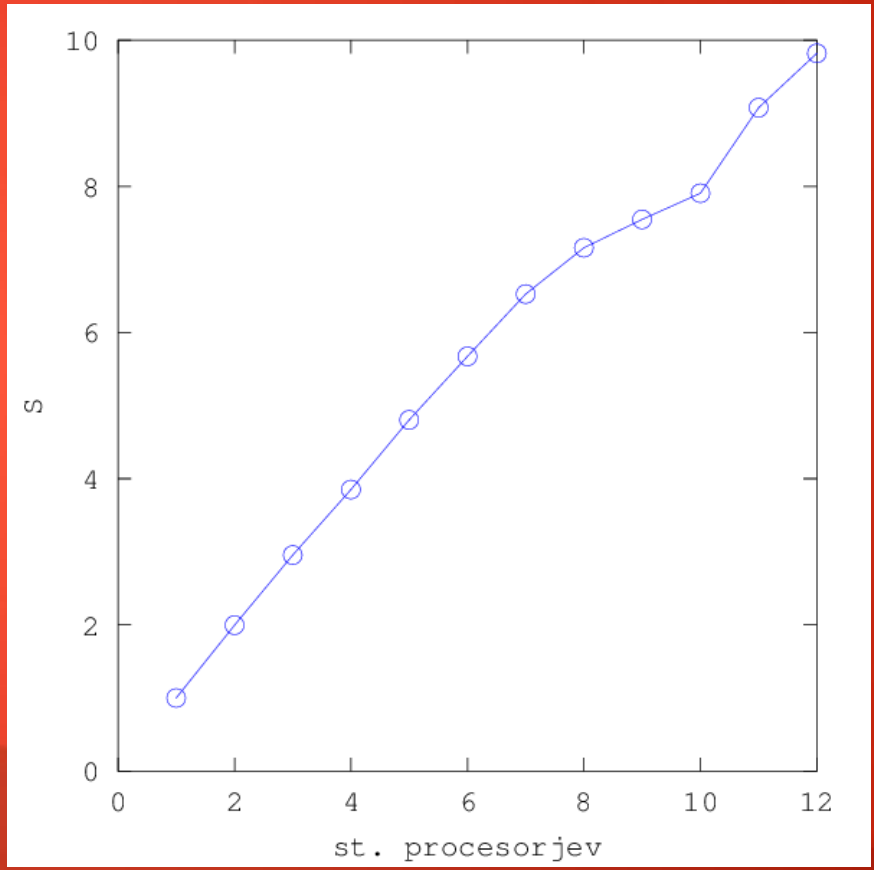
Omejitve pohitritve

- Zaporedna (sekvenča) narava problema
  - Delež problema, ki se mora izvesti zaporedno
  - Amdahlov zakon: min čas za rešitev problema je $t_s + t_p / n$
- Izgube zaradi paralelizacije (overhead)
  - Dekompozicija problema
  - Pošiljanje sporočil
  - Sinhronizacija

Primeri

Iskanje največje klike

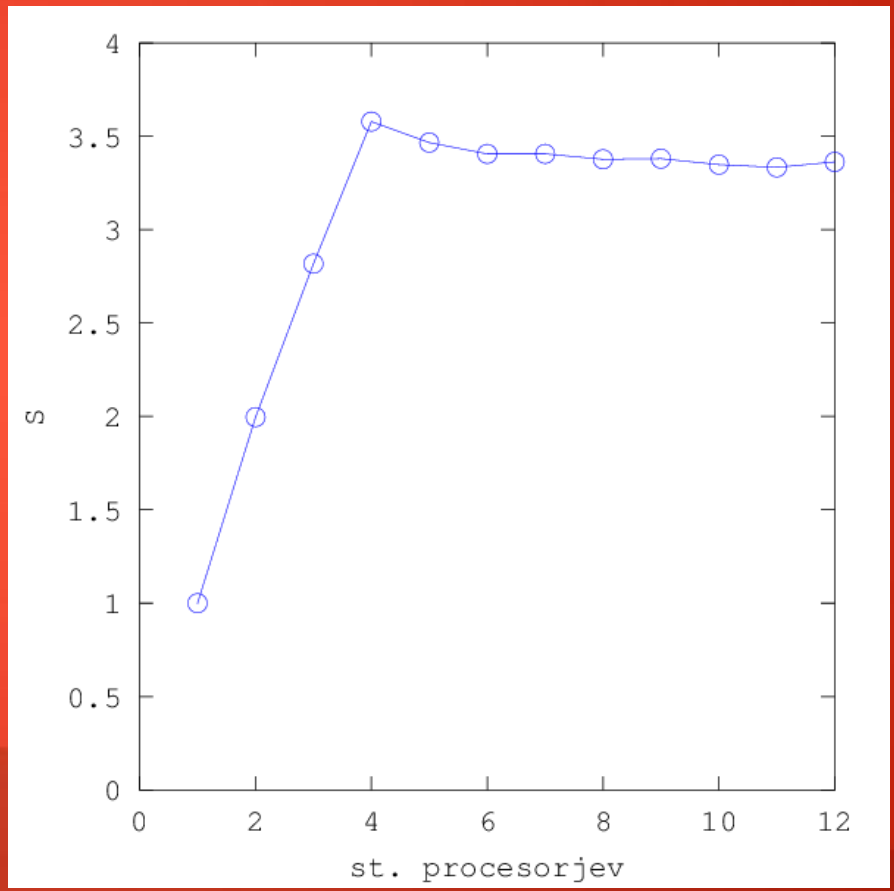
- Slika kaže na razmeroma linearno pohitritev
- Nihanja zato, ker niha število korakov iskanja



Primeri

Iskanje največje klike

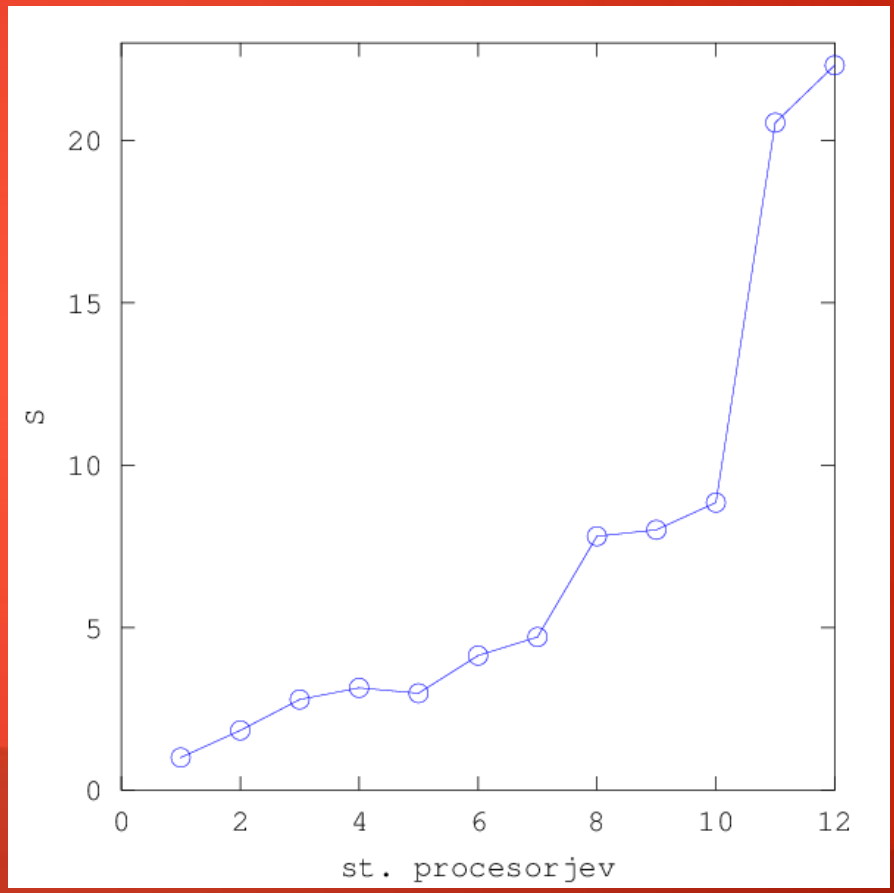
- Drug vhodni graf
- Več kot 4 procesorji na enkrat ne koristijo; celo škodujejo



Primeri

Iskanje največje klike

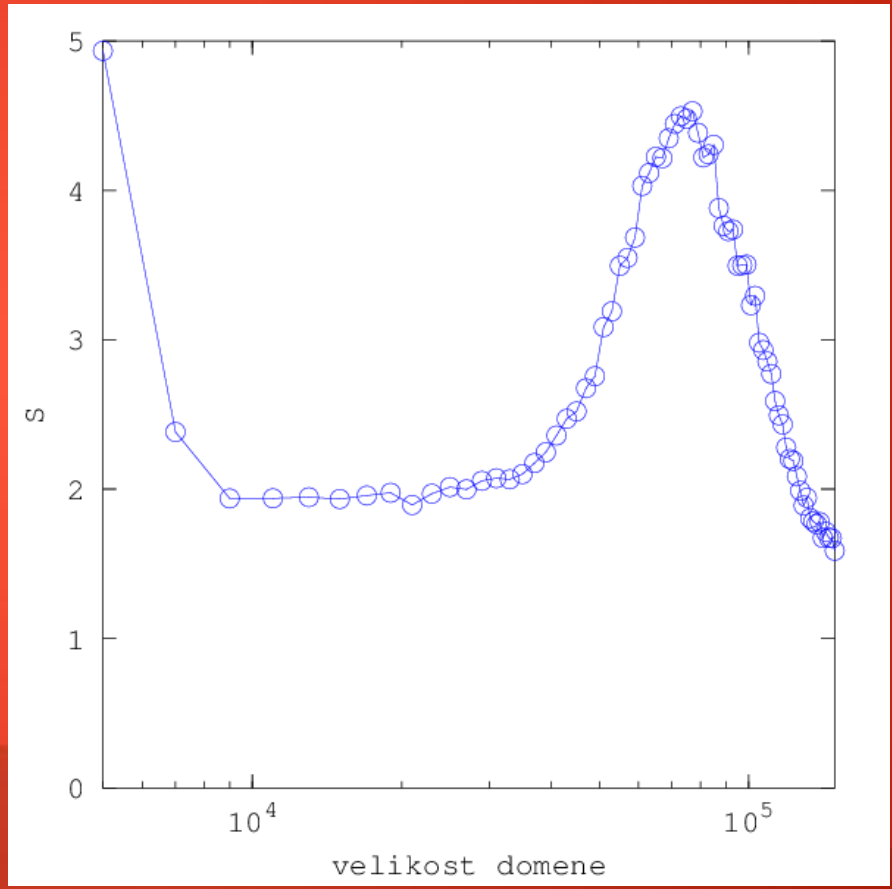
- Tretji vhodni graf
- Zato ker je isanje največje klike = preiskovanje drevesa rešitev



Primeri

Simulacija difuzije temperature na 2D domeni

- Slika pohitritve na 2 procesorjih
- Super-linearna pohitritev ko velikost domene sovpada z velikostjo dveh predpomnilnikov



Nivoji uvedbe vzporednosti

- Bitni: operacije nad vektorji bitov
  - Operacije nad 8 bitnimi operandi na več bitni arhitekturi
- Na nivoju operacij: cevovod
- Vektorske operacije: po 2, 4, 8, 16 operandov naenkrat
- Super-skalarnost: več neodvisnih operacije se izvede hkrati
- Multi- in many- core arhitekture: skupen pomnilnik
- Porazdeljeno računanje: komunikacija prek sporočil

Izkoriščanje vzporednosti

- Avtomatsko
  - Paralelni programski jeziki (Erlang, OpenCL)
  - Porazdeljene podatkovne baze
  - Porazdeljeni datotečni sistemi
- Visoko-nivojsko
  - MapReduce
- Nizko-nivojsko
  - MPI
  - OpenMP
- Direktno
  - Uporaba bitnih in vektorskih operacij, niti, procesov, ...

Pogoste težave pri vpeljavi vzporednosti

- Razdelitev na podprobleme, ki niso popolnoma neodvisni
  - Odvisnosti predstavljajo komunikacijo med procesorji, ki rešujejo podprobleme
- Podproblemi niso enako zahtevni
  - 'Load balancing'
  - Razdelitev na čim manjše podprobleme
- Zaporedni deli problema

Pomembni vzporedni algoritmi

- Linearna algebra
- FFT
- Mrežne in brez-mrežne metode
- Monte Carlo simulacije
- Algoritmi nad grafi in drevesi
- Dinamično programiranje
- Problem n teles
- Kombinatorična logika (šifriranje)

Amdahlov in Gustafsonov zakon

- Amdahl:
  - Obstaja mejna pohitritev, ki se ji lahko približamo z veliko procesorji, ne moremo je pa preseči
  - Vzrok leži v zaporednem delu algoritma
  - Ni smiselno imeti zelo velikega števila procesorjev
- Gustafson:
  - Zaporedni delež algoritma ponavadi ni konstanten ampak odvisen od velikosti problema; z velikostjo se zmanjšuje
  - Pri zelo velikih problemih postane zaporedni del nepomemben
  - Velike probleme se uspešno rešuje z veliko procesorji

Snovanje vzporednih algoritmov

- Identificirati je treba naslednje lastnosti vzporednosti
  - Sočasnosti: kaj se lahko izvaja hkrati
  - Skalabilnost: kako se lastnosti vzporednosti spreminjajo z večanjem problema in večanjem računalnika
  - Lokalnost
  - Modularnost

Sočasnost

- Deli programa se lahko izvajajo sočasno, če:
  - So na voljo vsi podatki
  - So reševanja posameznih delov neodvisna med seboj
- Primer: seštevanje števil od 1 do n:
  - Lahko razdellimo na log(n) neodvisnih korakov:
    1. korak: a=1+2; b=3+4; c=4+5; … z=n-1+n;
    2. korak: a=a+b; b=c+d; c=e+f; …
    …
    log(n)-ti korak: rezultat=a+b;
  - Vsak korak potrebuje rezultate prejšnjega koraka
  - Zgodnji koraki potrebujejo zelo veliko seštevalnikov

Skalabilnost

- Učinkovitost programa se praviloma manjša s številom procesorjev
  - Povečuje se dodatno delo – drobljenje problema, komunikacija, …
  - Manj kot se učinkovitost zmanjšuje, večja je skalabilnost
- Dobri (splošni) vzporedni algoritmi delujejo dobro ne glede na število procesorjev
- Skalabilnost omogoča enostaven prenos algoritma/programa na drug sistem
- Skalabilnost omogoča reševanje večjih problemov z močnejšim računalnikom

Lokalnost

- Je možnost, da program uporablja podatke iz lokalnega pomnilnika
  - To je ponavadi isti pomnilnik v katerem se nahaja tudi program na posameznem procesorju
- Dostopanje do lokalnega pomnilnika je običajno mnogo hitrejše (cenejše) od dostopanja do ostalih pomnilnikov
- Tipična razmerja latenc:
  - 1:10 med nivoji predpomnilnika
  - 1:100 L1 predpomnilnik proti RAMu
  - 1:100 RAM proti GB Ethernetu
  - 1:1000 RAM proti SSD disku

Modularnost

- Moduli so deli programa, ki jih lahko razvijamo ločeno med seboj
- Moduli se lahko združujejo ali uporabljajo za druge aplikacije
- Interakcija med moduli prek dobro definiranih vmesnikov
- Modularna zasnova zmanjšuje zapletenost in omogoča ponovno uporabo preizkušenih delov programa
- Modularnost preko kompozicije (organizacija modulov) pripomore k lokalnosti, skalabilnosti, prenosljivosti in sočasnosti

Snovanje vzporednega programa

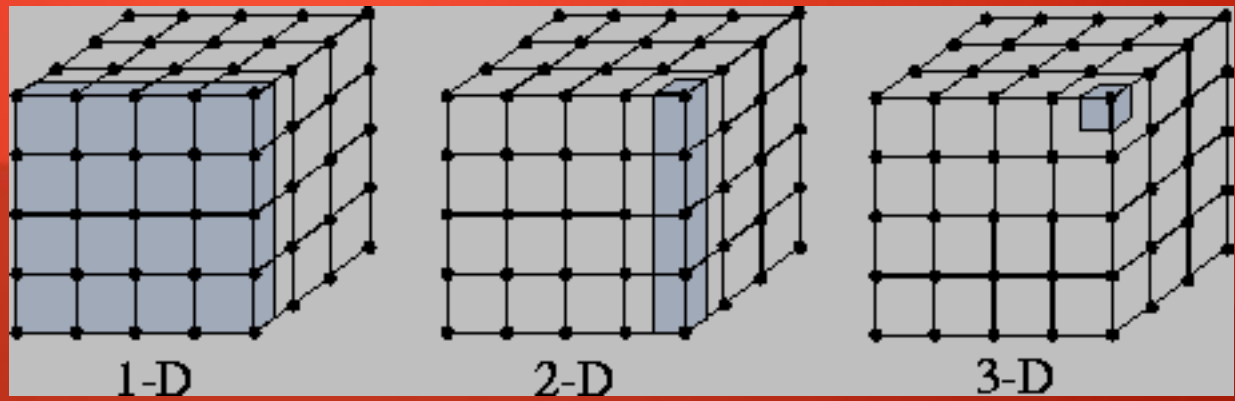
- Štiri faze (po Ianu Fosterju):
  - Delitev (partitioning)
  - Komunikacija (communication)
  - Združevanje (agglomeration)
  - Preslikava (mapping)
- Prvi dve fazi vplivata na sočasnost in skalabilnost
- Zadnji dve fazi poskušata uravnotežiti delo, najti čim več lokalnosti in izboljšati zmogljivosti programa na vzporednem računalniku

Delitev

- Cilj je razdelitev dela (obremenitve, opravil) med procesorje na vzporednem računalniku
- Rezultat naj bo čim večje število majhnih opravil, ki se lahko izvedejo sočasno
- Delitev po
  - Funkcijah – delijo se faze računanja
  - Domeni – delijo se podatki
- Delitev je abstraktna, splošna, ne deluje za ciljni računalnik

Delitev domene

- Primer – 3D kocka sestavljena iz 3D mreže točk.
- Možna je delitev v eni, dveh, ali treh dimenzijah
  - Razlike so v enostavnosti delitve in kasnejše komunikacije, fleksibilnosti rešitve, količini potrebne komunikacije
- Možna je tudi manj regularna delitev, ki pa pride bolj v poštev ob manj regularnih modelih

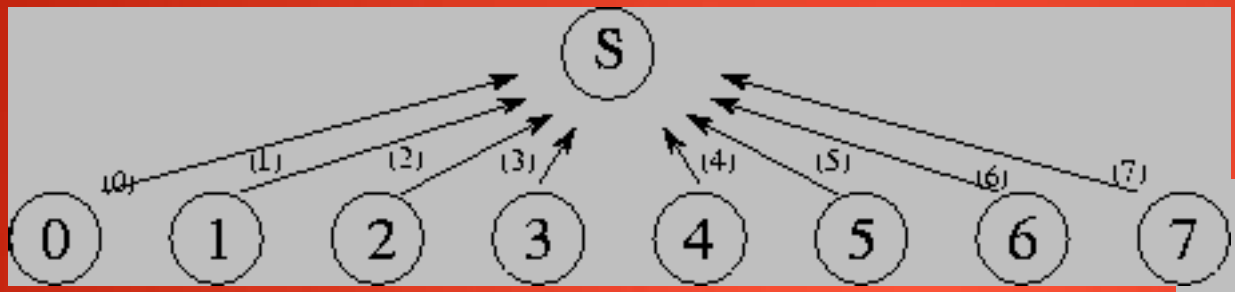


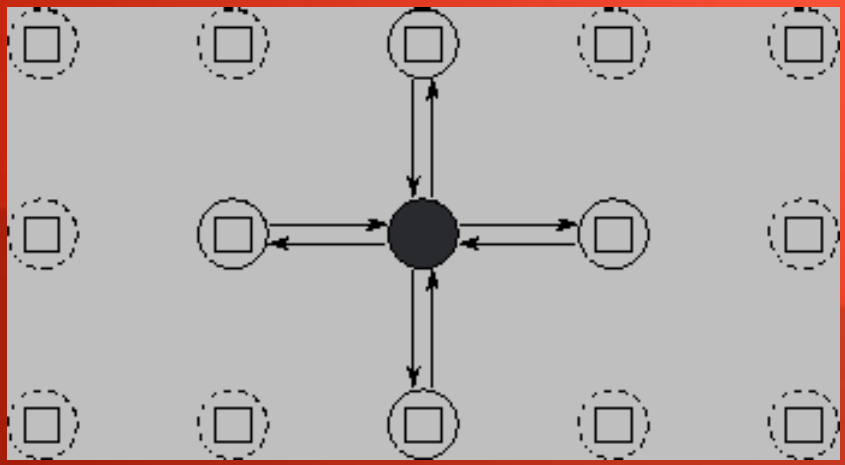
Komunikacija

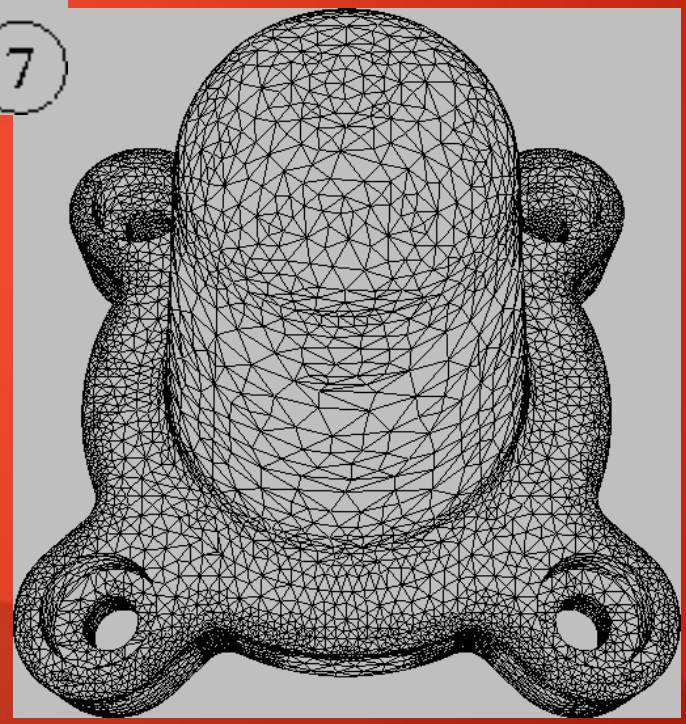
- V splošnem se opravila, določena v fazi delitve, ne morejo izvajati popolnoma neodvisno, ampak vplivajo eden na drugega
- Obstajajo tudi 'globalni' podatki, ki se uporabljajo pri več opravilih
- Zasnova komunikacije opredeli kateri podatki se bodo prenašali in med katerimi opravili
  - Kanali – kje se bodo podatki prenašali
  - Izvori in ponori – kdo pošilja in kdo sprejema
  - Definicija sporočil

Komunikacija

- Delitev glede na pokritost opravil
  - Lokalna – opravilo komunicira le z majhno podmnožico ostalih opravil (s t.i. sosedi)
  - Globalna – opravilo komunicira nad veliko množico opravil ali celo z vsemi opravili
- Delitev glede na strukturo
  - Strukturirana – definira lokalno komunikacijo, ki se ne spreminja; npr. opravila povezuje v mrežo
  - Nestrukturirana – komunikacija je poljuben graf, lahko je odvisen od vhodnih podatkov, lahko se spreminja s časom


S
0
1
2
3
4
5
6
7





Združevanje

- Združevanje v nasprotju z delitvijo že cilja na določen vzporedni računalnik
- Cilji:
  - Zmanjšanje količine komunikacije z povečanjem zrnatosti
  - Ohranjanje skalabilnosti z zadosti velikim številom opravil (večjim od števila procesorjev)
  - Zmanjšanje cene programiranja – program naj bo čim bolj fleksibilen za bodoče aplikacije na drugačnih računalnikih

Preslikava

- Določa katero opravilo se bo izvedlo na kateri enoti (na izbiro so lahko procesorji in pospeševalniki)
- Lahko je statična ali dinamična – v slednjem primeru se določi le algoritem preslikave
- Cilja na uravnoteženo porazdelitev opravil med procesnimi enotami.
- Postopek uravnoteženja (load balancing) je lahko statičen (regularne mreže) ali pa se dinamično spreminja med izvajanjem programa