Paralelizacija Celularnih avtomatov (Game of Life)

Matej Kristan, Tadej Hiti

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko

Kazalo

Uvod

Tekom projektne naloge sva z različnimi pristopi in tehnikami paralelizacije za vsakega izmed opisanih paralelnih pristopov implementirala algoritem Game of Life na več jedrih/nitih ter tako pohitrila izvajanje samega algoritma. Prav tako sva konstantno dokumentirala vse pristope ter analizirala učinkovitost in pohitritev vsakega izmed prevedenih paralelnih algoritmov.

Motivacija

Izvor motivacije za izbiro igre “Game of Life” ter celularnih avtomatov splošneje kot projekt pri predmetu Paralelni sistemi izhaja iz zanimivih ter abstraktnih konceptov, ki se jih teoretično ozadje igre dotika. Zanimivo je, da kljub znanim pravilom obstoja celic skozi generacije ne obstaja algoritem, ki bi mu za vhod podali vhodno (začetna generacija) in poljubno (poljubna generacija) stanje, ta pa bi izračunal ali bo do tega poljubnega stanja oziroma generacije sploh prišlo. Prav tako naju je navdihnilo spoznanje, da v naravi obstajajo biološki procesi oziroma vzorci, ki se jih da dobro simulirati s pomočjo celularnih avtomatov.

Celularni avtomati (Game of Life)

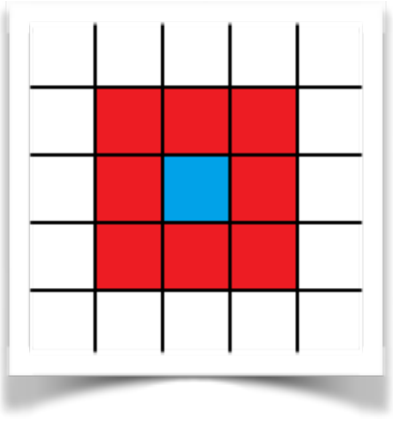
Opis

Povod nastanka igre Game of Life prihaja iz prejšnjega stoletja, ko je britanski matematik John Horton Conway želel rešiti zastavljeni problem matematika John von Neumann-a, ki je želel odkriti ali obstaja hipotetični stroj, ki bi bil zmožen na podlagi zbranih surovin zgraditi kopije sebe ter tako pospešiti iskanje možnosti obstoja življenja ter kolonizacije onkraj našega planeta.

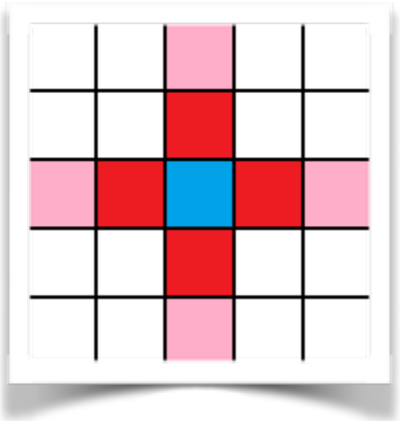
Game of Life je celularni avtomat, je igra brez igralca, kar pomeni da je evolucija odvisna od nič drugega kot začetnega podanega stanja ter vnaprej specificiranih nespreminjajočih pravil, ki opisujejo spreminjanje kvadaratnih celic na dvo-dimenzinalni neskončni ortogonalni mreži.
Vsaka celica na mreži drži eno izmed dveh stanj: živo ali mrtvo. Vsaka celica je s pomočjo vnaprej definiranih pravil v interakciji z sosednjimi celicami, ki držijo usodo trenutne celice ali bo ta skozi naslednjo generacijo obstala ali ne.

Najina realizacija problema bo priredba, kar pomeni da se bova osredotočila tudi na druge celularne avtomate in ne samo celularnega avtomata znanega kot “igra življenja”, kar pa pomeni da sva definirala več možnih soseščin, ki vplivajo na obstoj celice skozi generacijo.

Med slednjimi sva trenutno implementirala sledeči soseščini celic, kjer je z modro ponazorjena opazovana celica in z rdečo sosednje celice, ki vplivajo na opazovano.



Moorova soseščina



von Neumannova soseščina

Pravila

- Vsaka živa celica z manj kot dvema živima sosedoma umre kot posledica premajhne populacije.
- Vsaka živa celica z dvema ali tremi živimi sosedi preživi skozi naslednjo generacijo.
- Vsaka živa celica z več kot tremi živimi sosedi umre kot posledica prevelike populacije.
- Vsaka mrtva celica z natančno tremi živimi sosedi se spremeni v živo celico, kot posledica reprodukcije

Pseudokoda:

```
1   foreach (cell in grid) {
2       neighbours = 0;
3       foreach (neighbour in neighborhood) {
4           if (isAlive(neighbour))
5               neighbours++;
6       }
7       if (cell is alive) {
8           if !((neighbours == 2) || (neighbours == 3) )
9               kill cell;
10      }
11      else {
12          if (neighbours == 3)
13              revive square;
14      }
15  }
```

Ocenitev zahtevnosti algoritma:

Časovna zahtevnost: f(n,m,s) = **O(n*m*s)**
Prostorska zahtevnost: g(n,m) = O(2*(n*m)) = **O(n*m)**

n = velikost horizontalnega polja
m = velikost vertikalnega polja
s = število vplivnih okrožnih sosedov

Sekvenčni algoritem (Game of Life)

Kratek opis

Pri implementaciji sekvenčnega algoritma sta bila v uporabi zgolj navaden urejevalnik teksta ter terminal s pomočjo katerega sva poskrbela za zagon algoritma preko gcc - GNU prevajalnika.
Za izris generacij ‘igre življenja’ je bila uporabljena zunanja knjižnica SDL2 - https://www.libsdl.org/.

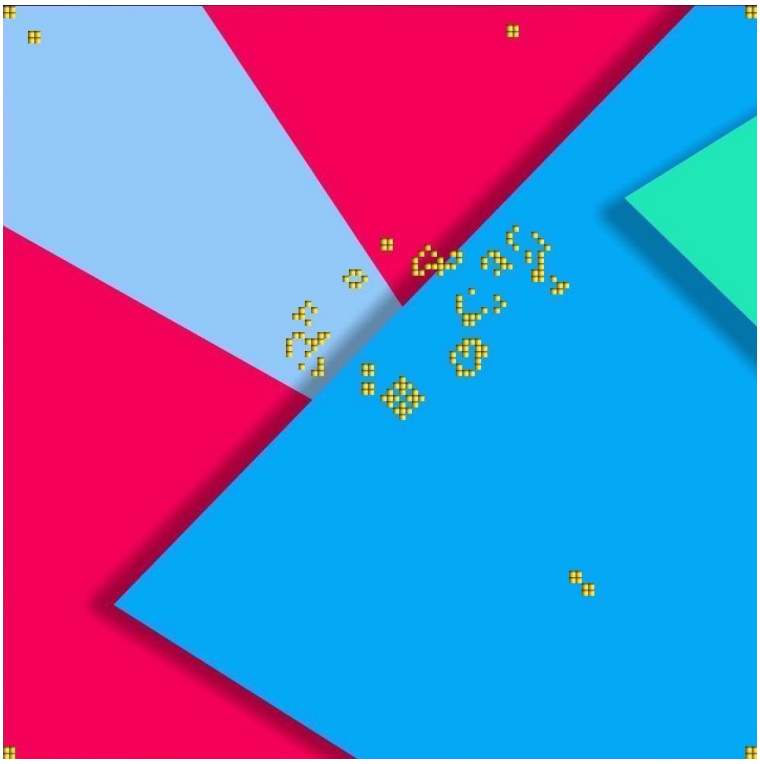
V uporabi ni bilo posebnih podatkovnih struktur, zgolj uporaba dvo-dimenzinalnih tabel med drugim tudi za predstavitev sveta algoritma.

Vhodni podatki programa:

- velikost sveta (višina, širina, in število simuliranih generacij)
- začetna generacija sveta

Meritve algoritma:

Meritve algoritma so bile izvedene na algoritmu celularnega avtomata Game of Life, pravila ostajajo nespremenjena, definirana zgoraj v podpoglavju “Pravila”, torej meritve so bile izvedene na 3x3 soseščini, vsaka celica ima 9 sosedov, oziroma po principu Moorove soseščine.



Slika 1: Simulacija algoritma Game of Life

Meritve sekvenčnega algoritma

Tabela 1: Čas izvajanja in standardna napaka meritve (SE) v odvisnosti od velikosti reševanega problema (N = višina * širina * število simuliranih generacij).

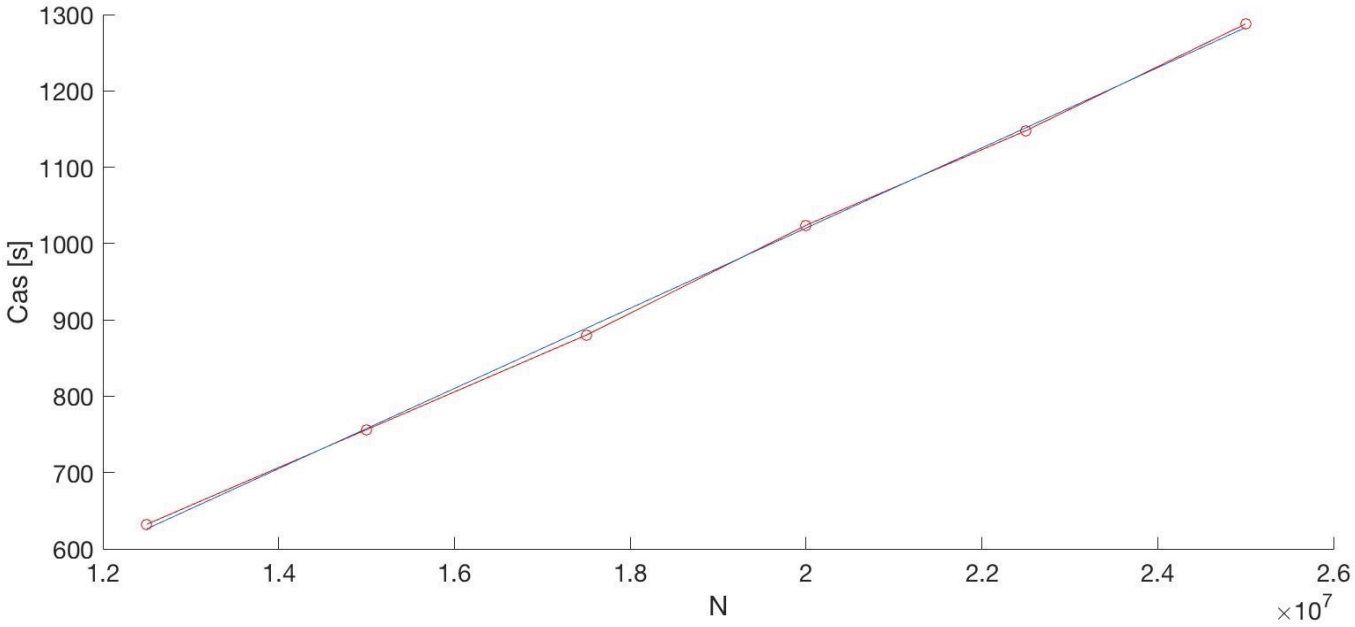
N (višina, širina, št. generacij)	Čas [s]	SE [s]
12500000 (500, 500, 50)	0.64	0,007
15000000 (600, 500, 50)	0.74	0,007
17500000 (700, 500, 50)	0.86	0,004
20000000(800, 500, 50)	0.98	0,006
22500000(900, 500, 50)	1.11	0,008
25000000(1000, 500, 50)	1.23	0,004

Tabela 2: Čas izvajanja in standardna napaka meritve (SE) v odvisnosti od velikosti reševanega problema (N = višina * širina * število simuliranih generacij).

N (višina, širina, št. generacij)	Čas [s]	SE [s]
12500000 (500, 500, 50)	0.63	0,001
15000000 (500, 600, 50)	0.76	0,004
17500000 (500, 700, 50)	0.88	0,004
20000000(500, 800, 50)	1.02	0,004
22500000(500, 900, 50)	1.15	0,003
25000000(500, 1000, 50)	1.29	0,010

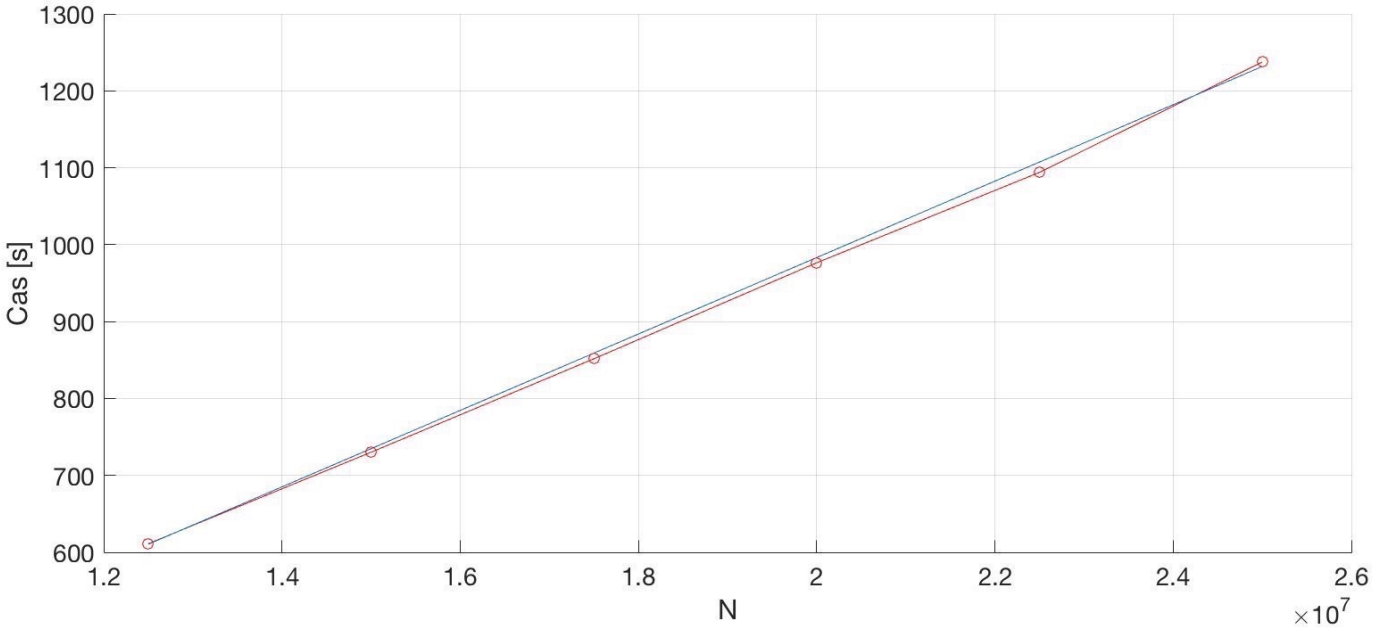
Tabela 3: Čas izvajanja in standardna napaka meritve (SE) v odvisnosti od velikosti reševanega problema (N = višina * širina * število simuliranih generacij).

N (višina, širina, št. generacij)	Čas [s]	SE [s]
12500000 (500, 500, 50)	0.61	0,002
15000000 (500, 500, 60)	0.73	0,001
17500000 (500, 500, 70)	0.85	0,001
20000000(500, 500, 80)	0.98	0,003
22500000(500, 500, 90)	1.11	0,002
25000000(500, 500, 100)	1.24	0,013



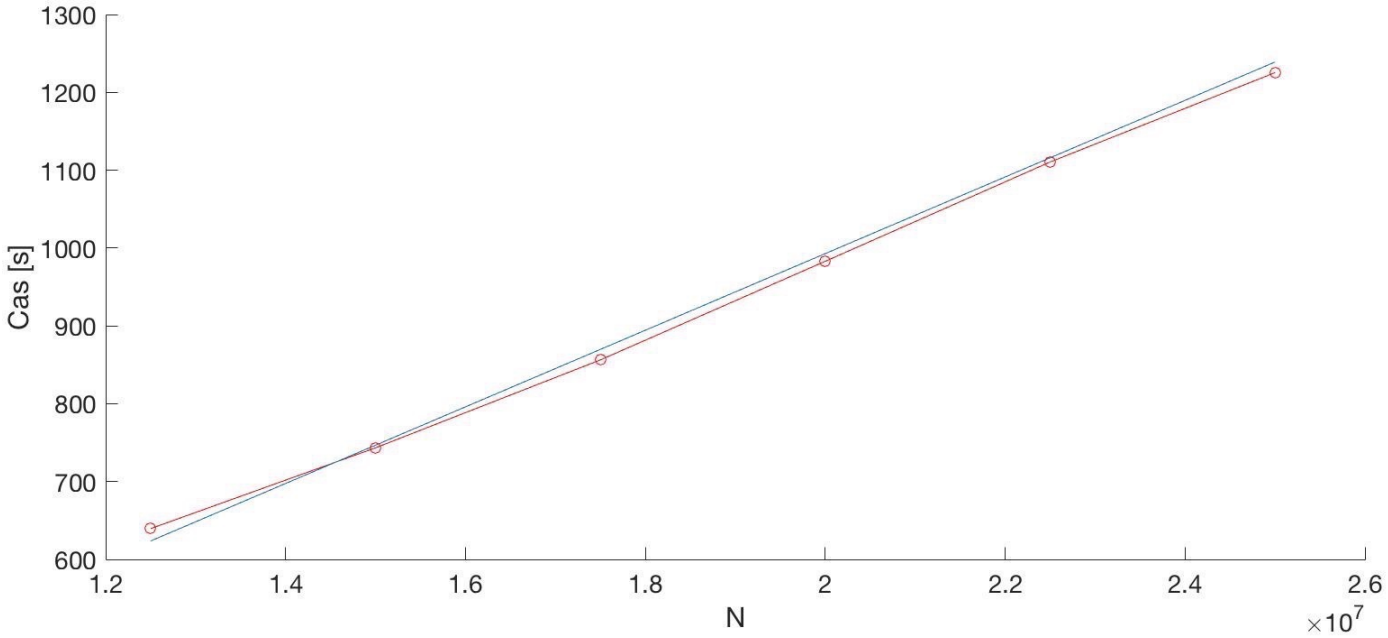
Graf 1: Čas izvajanja v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje višine simuliranega sveta).

Izmerjena časovna odvisnost: O(y) = 8.42 + 4.92 * x



Graf 2: Čas izvajanja v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje širine simuliranega sveta).

Izmerjena časovna odvisnost: O(y) = - 3.01 + 5.25 * x



Graf 3: Čas izvajanja v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje števila generacij simuliranega sveta).

Izmerjena časovna odvisnost: $O(y) = - 1.47 + 4.96 * x$

Teoretična časovna odvisnost:

Teoretična časovna odvisnost je za vse grafe enaka, ta je O(n) in se pričakovano zelo lepo prilega izmerjeni časovni odvisnosti.

PThreads algoritem (Game of Life)

Kratek opis paralelizacije algoritma

Algoritem Game of Life z rahlo spremembo pravil ter na soseščini 5x5 je bil paraleliziran s pomočjo knjižnice PThreads, kjer vsaka kreirana nit dobi določen del polja, ki ga nit obdela ter vrne svoj rezultat, ki je kasneje združen z neko določeno 'glavno' nitjo v skupni rezultat, tako se s pomočjo delitve dela med nitmi algoritem znatno pohitri.

Delitev dela med nitmi:

Torej imamo polje velikosti W x H, kjer je *W* širina ter *H* višina obdelovalnega polja ter *p* zaznamuje število kreiranih niti.

Vsaka izmed kreiranih niti dobi določeno število vrstic polja po sledečem pravilu:

delta = H / p + 1;

nit.začetek = delta (izjema je začetna nit, kjer je začetek seveda enak 0)
nit.konec = nit.začetek + delta

Vsaka nit tako dobi enako velikost obdelovalnega podproblema, seveda so tu izjeme:

- V kolikor je število niti manj kot pa je višina obdelovalnega problema, zadnjih *H - p* ne dobi obdelovalnega kosa polja.
- V kolikor je H liho število, potemtakem dobi zadnja nit prostorsko manjši obdelovalni podproblem.

Komunikacija med nitmi:

Torej delitev dela med nitmi se izvede znotraj vsake računane generacije. Preden niti sploh dobijo kakršno koli delitev dela, se morajo počakati, da so vse zaključile z izvajanjem svojega prejšnjega podproblema (računanje prejšnje generacije). Slednje zagotovimo z ukazom *pthread_barrier_wait (pthread_barrier_t barrier)*.
Ko so niti sinhronizirane se prične dodeljevanje dela ter obdelava posameznih podproblemov. Zopet za zagotovitev, da so vse niti prenehale z obdelovanjem svojega podproblema, uporabimo *"bariero"*, ki počaka na dokončanje izvajanje vseh niti. Ko je sinhronizacija zopet usklajena začetna nič (p == 0) prične s kopiranjem vsake vrstice polja v istoležne vrstice novega polja, ki se uporabi v naslednji iteraciji.

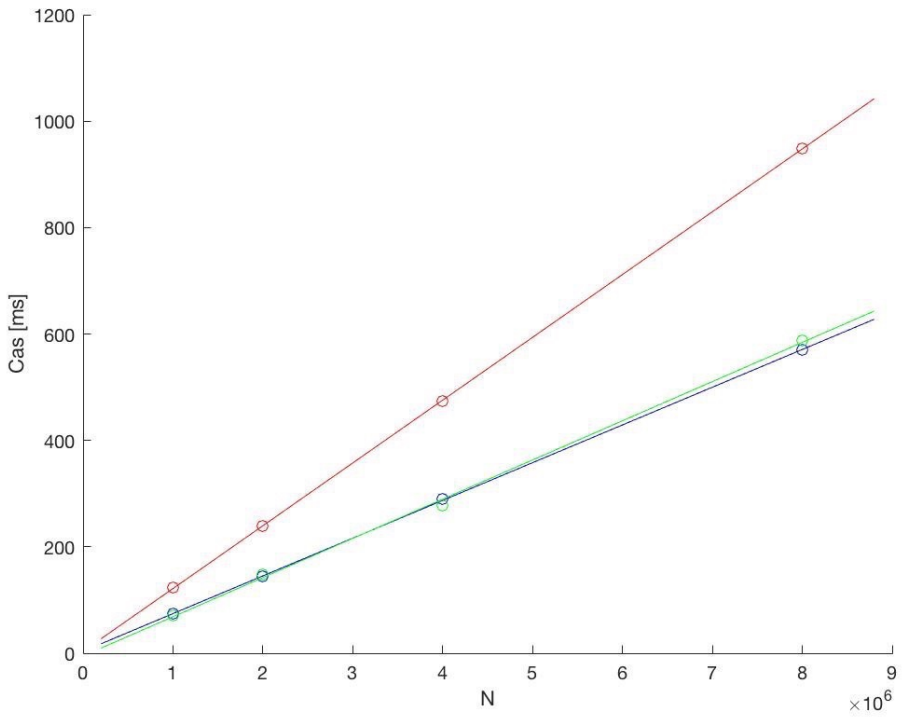
Meritve paraleliziranega algoritma

Vse meritve algoritma so bile izvedene na soseščini velikosti 5x5 na polju začetne velikosti 100x100 z prav tako naraščajočim številom generacij. V zgornjih dveh podpoglavjih (Delitev dela med nitmi, Komunikacija med nitmi) sem opisal način dela ter komunikacijo med nitmi, ki ga trenutno uporabljava, sva pa tudi izvedla meritve algoritma, kjer sva skozi vsako generacijo kreirala niti ter jim dodelila podproblem na enak način, ter jih ob koncu izvajanja pokončava.

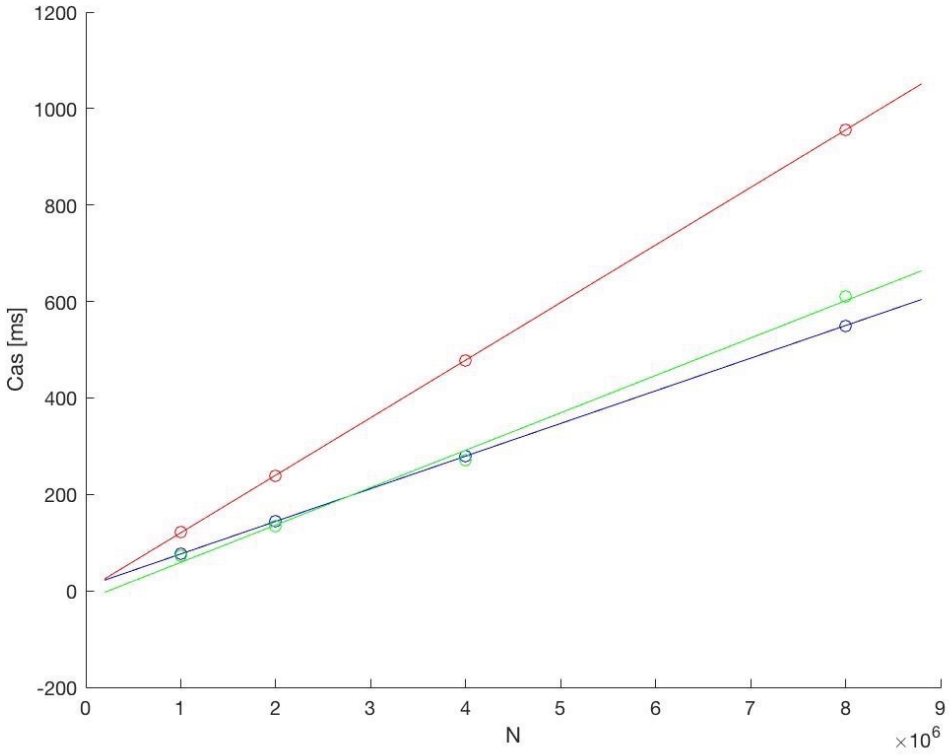
Legenda:

Vsaka točka na grafu predstavlja povprečno izmerjeno meritev desetih posameznih merjenj pri dani velikosti reševanega problema.

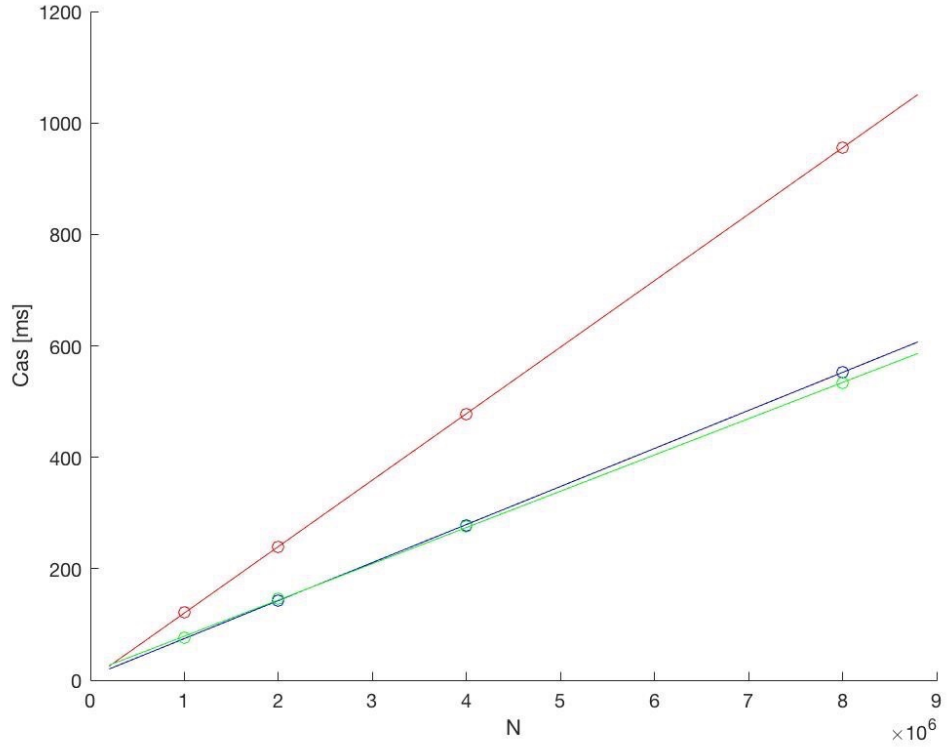
A ——— 1 nit
B ——— 2 niti (kreiranje niti skozi vsako generacijo)
C ——— 2 niti (sinhronizacija niti na začetku vsake simulirane generacije)



Graf 1: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje stevila iteracij).



Graf 2: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje širine polja).



Graf 3: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje višine polja).

N / Čas [ms]	A	B	C
100 * (100*100)	121	74	70
200 * (100*100)	239	143	147
400 * (100*100)	474	289	278
800 * (100*100)	948	570	588
800 * (100*100)	122	76	72
800 * (100*100)	238	143	135
800 * (100*100)	476	280	270
800 * (100*100)	956	549	610
100 * (100*100)	121	75	75
100 * (100*200)	239	142	146
100 * (100*400)	477	278	275
100 * (100*800)	956	552	533

Tabela 1: Časi izvajanja v odvisnosti od velikosti reševanih problemov pri različnih načinih izvajanja (glej opredelitve pod grafi)

N - velikost reševanega problema = število generacij * (W * H)

Analiza meritev

S = T(sek) / T(p)
E = S / p

S - pohitritev algoritma, kjer je T(sek) čas izvajanja sekvenčnega programa in T(p) čas izvajanja paraleliziranega programa nad p nitmi.

E - Učinkovitost algoritma

	2 niti - A		2 niti - B	
N	S	E	S	E
2000 * (100*100)	1,64	0,82	1,63	0,82
3000 * (100*100)	1,63	0,82	1,65	0,82
4000 * (100*100)	1,64	0,82	1,70	0,85
5000 * (100*100)	1,56	0,78	1,76	0,88

Tabela 2: Prikaz pohitritve in učinkovitosti različnih načinov paralelizacije algoritmov napram sekvenčnemu algoritmu pri naraščajočem številu generacij.

A - kreiranje niti skozi vsako generacijo.
B - kreiranje niti zgolj na začetku ter sinhronizacija niti na začetku vsake simulirane generacije.

S povečanjem števila niti se izboljša tudi pohitritev algoritma, vendar pri paraleliziranem algoritmu, kjer se niti ustavarijo zgolj na začetku simulacije ter sinhronizirajo po vsakem delovanju za 4 niti ne dobiva več opaznih pohitritev izvajanja algoritma, mnenja sva da je razlog za tem preveliko število niti ter tako več izgubljenega časa pri komunikaciji oz. sinhronizaciji samih niti.

OpenMP algoritem (Game of Life)

Kratek opis paralelizacije algoritma

Algoritem Game of Life z na soseščini 5x5 je bil paraleliziran s pomočjo knjižnice OpenMP, kjer vsaka kreirana nit dobi določeno število vrstic, ki jih nit obdela ter vrne svoj rezultat, ki je kasneje združen v funkciji addNewArea(…) v skupni rezultat.

Delitev dela med nitmi:

Delitev dela med nitmi knjižnica OpenMP izvede sama, tj. blokovna/ statična porazdelitev.
Za porazdelitev dela med nitmi med vrsticami sveta sva uporabila sledeči klic knjižnice #pragma omp parallel for shared(area).
Delitev dela med nitmi sva paralelizirala tudi po stolpcih sveta s klicem #pragma omp parallel for.

Algoritem je v vseh drugih pogledih praktično enak sekvenčnemu, seveda prilagojen za delo z knjižnico OpenMP.

Komunikacija med nitmi:

Delitev dela med nitmi knjižnica OpenMP izvede znotraj vsake računane generacije.

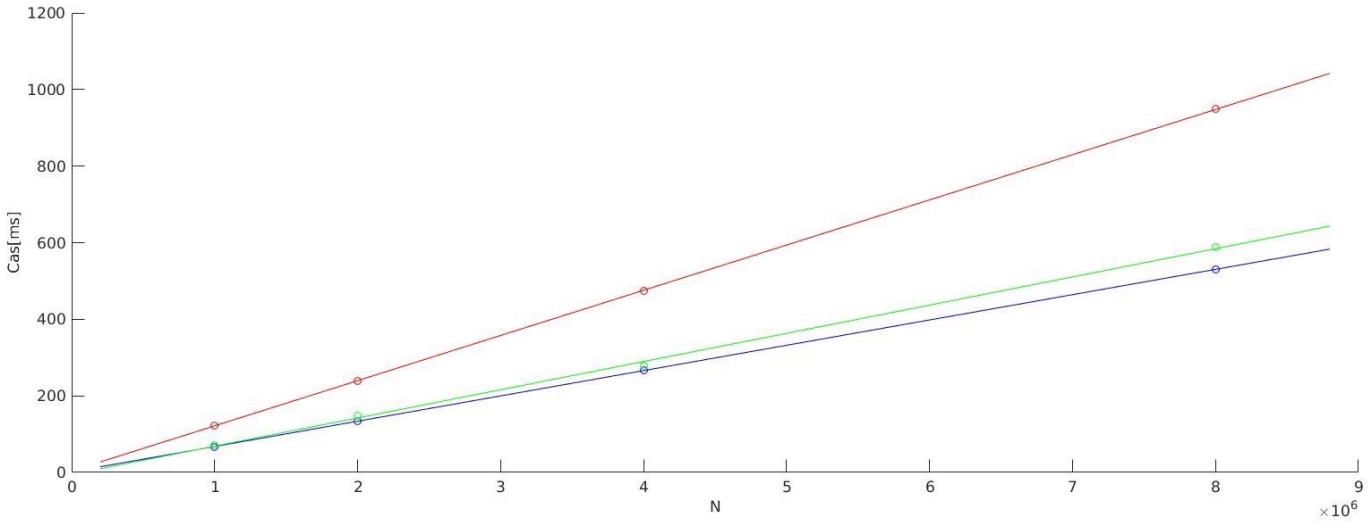
Meritve paraleliziranega algoritma

Vse meritve algoritma so bile izvedene na soseščini velikosti 5x5 na polju začetne velikosti 100x100 z prav tako naraščajočim številom generacij.

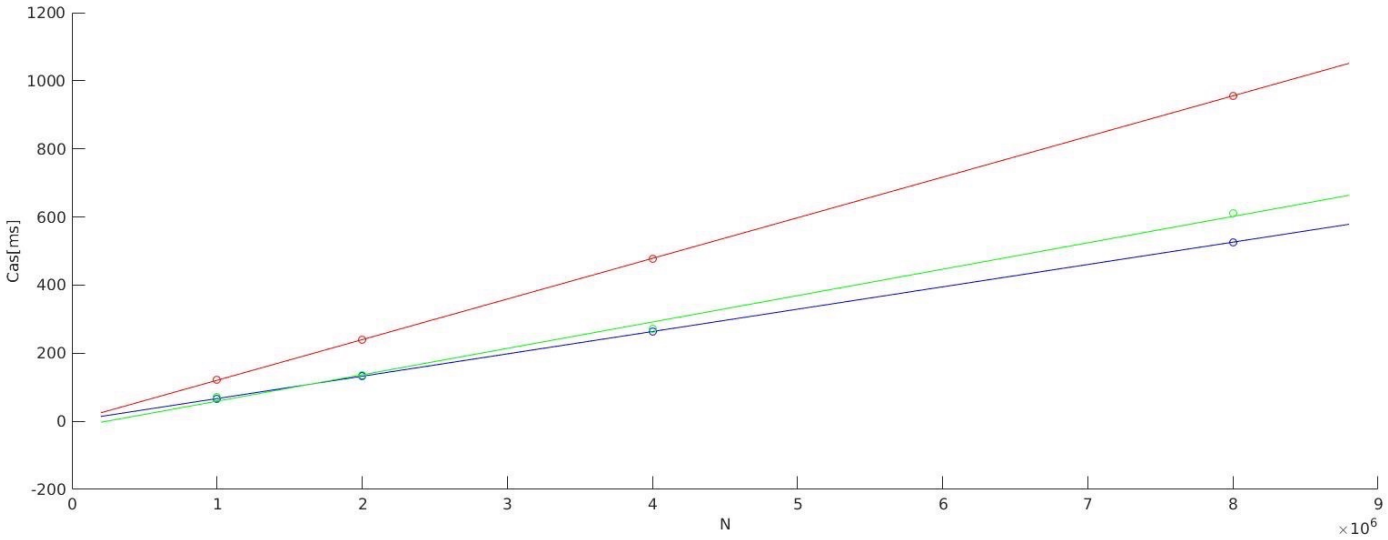
Legenda:

Vsaka točka na grafu predstavlja povprečno izmerjeno meritev desetih posameznih merjenj pri dani velikosti reševanega problema.

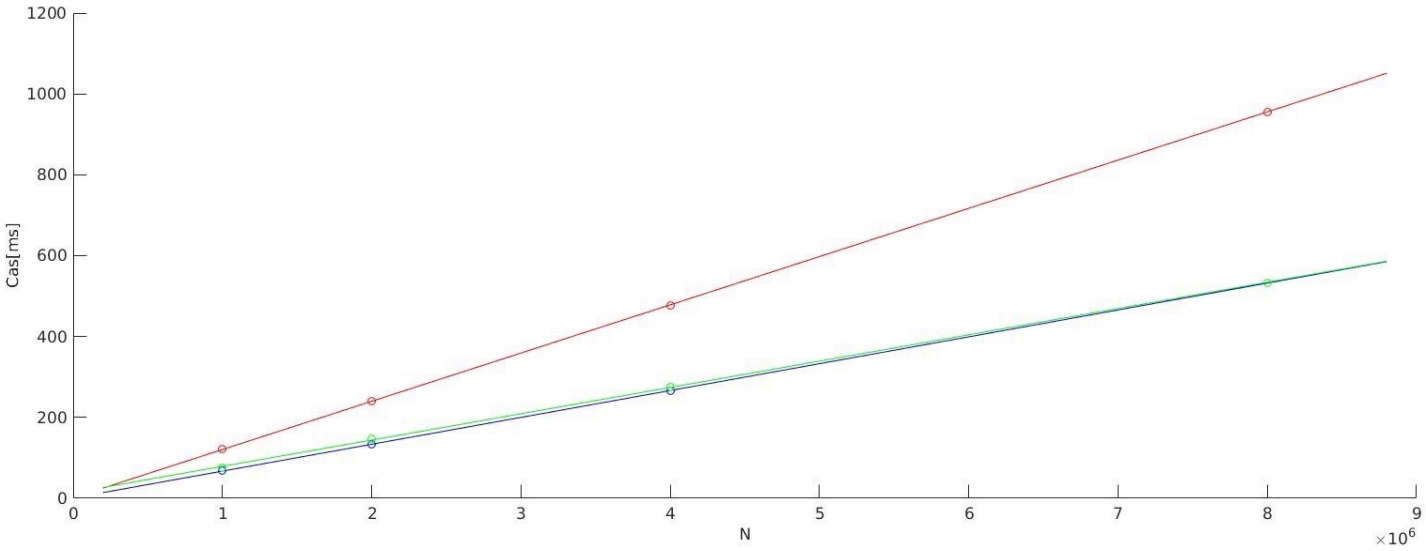
A ——— 1 nit
B ——— 2 niti (sinhronizacija niti na začetku vsake simulirane generacije - PThreads)
C ——— 2 niti (OpenMP)



Graf 1: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje stevila iteracij).



Graf 2: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje širine polja).



Graf 3: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje višine polja).

N / Čas [ms]	A	B	C
100 * (100*100)	121	70	68
200 * (100*100)	239	147	133
400 * (100*100)	474	278	267
800 * (100*100)	948	588	529
800 * (100*100)	122	72	66
800 * (200*100)	238	135	132
800 * (400*100)	476	270	263
800 * (800*100)	956	610	526
100 * (100*100)	121	75	68
100 * (100*200)	239	146	133
100 * (100*400)	477	275	266
100 * (100*800)	956	533	532

Tabela 1: Časi izvajanja v odvisnosti od velikosti reševanih problemov pri različnih načinih izvajanja (glej opredelitve pod grafi)

N - velikost reševanega problema = število generacij * (W * H)

Analiza meritev

S = T(sek) / T(p)
E = S / p

S - pohitritev algoritma, kjer je T(sek) čas izvajanja sekvenčnega programa in T(p) čas izvajanja paraleliziranega programa nad p nitmi.

E - Učinkovitost algoritma
Tabela 2: Prikaz pohitritve in učinkovitosti paraleliziranem algoritmu napram sekvenčnemu pri naraščajočem številu generacij.

	2 niti - OpenMP	
N	S	E
2000 * (100*100)	1,79	0,90
3000 * (100*100)	1,68	0,84
4000 * (100*100)	1,66	0,83
5000 * (100*100)	1,65	0,83

Če primerjava pohitritve časov prejšnjega paraleliziranega algoritma (PThreads) s paraleliziranim OpenMP algoritmom je slednji za odtenek hitrejši od prejšnjega.

Poročilo - OpenCL algoritem (Game of Life)

Kratek opis paralelizacije algoritma

Algoritem Game of Life na soseščini 5x5 je bil paraleliziran s pomočjo knjižnice OpenCL, ki omogoča pisanje in izvajanje programov na heterogenih platformah, med drugimi tudi na grafičnih procesnih enotah, na kateri se je najin algoritem tudi dejansko izvajal.

Delitev dela med nitmi:

GROUP_SIZE = 512	… Velikost mreže
WORKGROUP_SIZE = 8	… Število niti na blok (2x toliko niti v 2D bloku)
X	… Število mrež

Pri uporabi OpenCL knjižnice je program pred zagonom na heterogeni enoti najprej treba prevesti, ob podajanju zgornjih parametrov v točki prevajanja se najino igralno polje velikosti *X * GROUP_SIZE* (kjer je *X* naravno število) razdeli na *X* število mrež, znotraj katere je *GROUP_SIZE / WORKGROUP_SIZE* število blokov, in znotraj vsakega slednjega *WORKGROUP_SIZE* niti.

Po prevajanju programa se program začne izvajati na izbrani platformi ter heterogeni enoti. Algoritem po vsaki preračunani generaciji nastavi “stari svet” da kaže na “novi svet”, da v naslednji iteraciji upoštevamo novo stanje sveta. Ob koncu izvajanja glavnega programa se vse alokacije pomnilnika na grafični procesni enoti ter v glavnem pomnilniku sporostijo.

Ker je število niti znotraj mreže manjše kot je velikost celotnega sveta, v katerem niti obdelujejo podprobleme, si niti/bloki znotraj mreže razdelijo delo po sledečem postopku:

1. Vsaka izmed niti obdela svojo celico, tj. pogleda soseščino 5x5 okrog dane celice in shrani rezultat obstoja/ne obstoja obdelovane celice v globalni pomnilnik GPE na mesto kjer je lociran naš novo nastajajoči svet.

2. Ko dana nit obdela celico, se premakne na naslednjo celico znotraj naslednje mreže, s pomočjo računanja vrstice in stolpca najinega sveta, to pa se doseže s sledečima ukazoma:

    - get_local_size(0) … Pridobitev pozicije *vrstice* znotraj našega celotnega sveta
    - get_local_size(1) … Pridobitev pozicije *stolpca* znotraj našega celotnega sveta

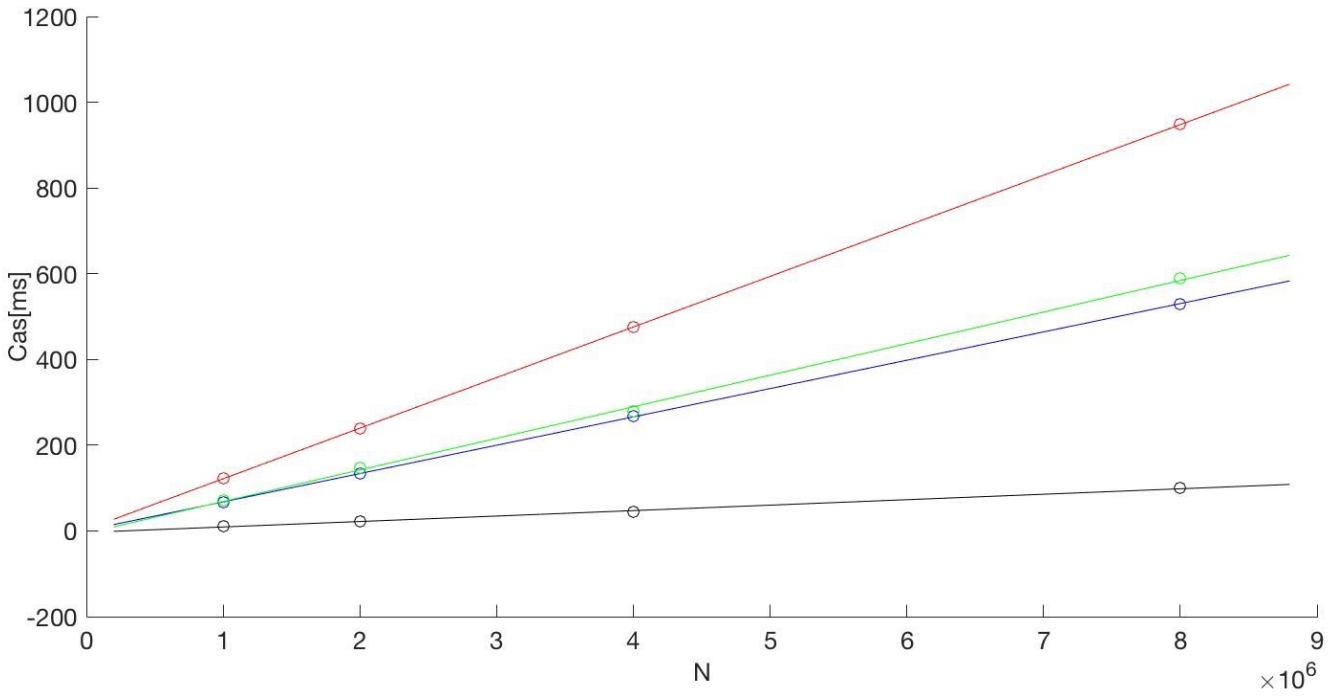
Meritve paraleliziranega algoritma

Vse meritve algoritma so bile izvedene na soseščini velikosti 5x5 na polju začetne velikosti 100x100 z prav tako naraščajočim številom generacij.

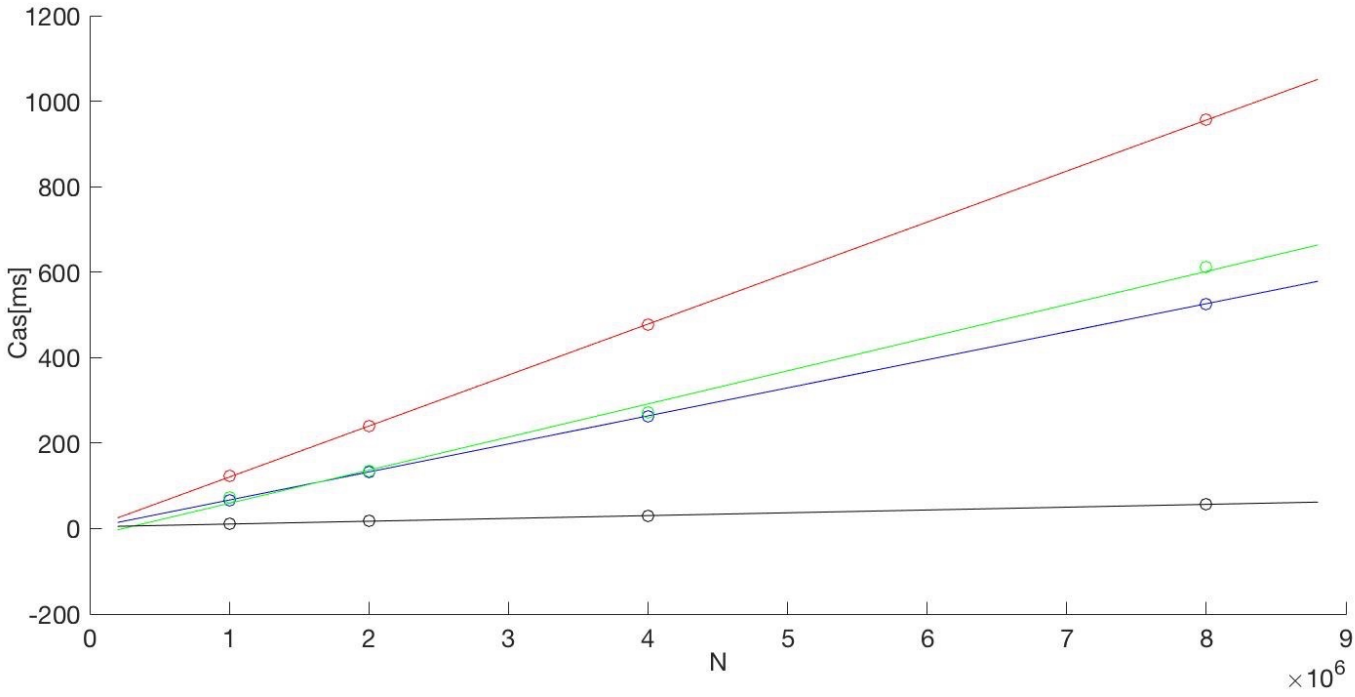
Legenda:

Vsaka točka na grafu predstavlja povprečno izmerjeno meritev desetih posameznih merjenj pri dani velikosti reševanega problema.

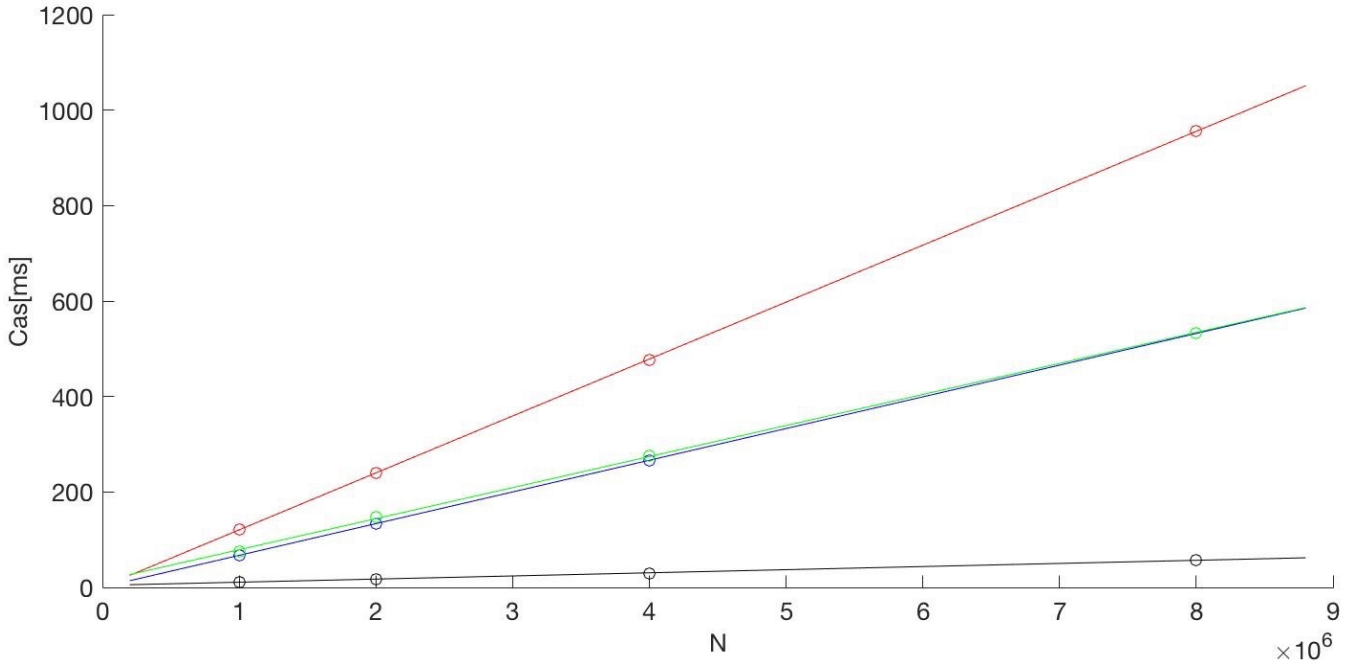
A ——— 1 nit
B ——— 2 niti (sinhronizacija niti na začetku vsake simulirane generacije - PThreads)
C ——— 2 niti (OpenMP)
D ——— *GROUP_SIZE* niti (OpenCL)



Graf 1: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih implementacijah ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje števila iteracij).



Graf 2: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih implementacijah ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje širine polja).



Graf 3: Čas izvajanja algoritmov v različnih načinih implementacijah ter na različnem številu niti v odvisnosti od velikosti reševanega problema (povečevanje višine polja).

N / Čas [ms]	A	B	C	D
100 * (100*100)	121	70	68	11
200 * (100*100)	239	147	133	22
400 * (100*100)	474	278	267	44
800 * (100*100)	948	588	529	99
800 * (100*100)	122	72	66	11
800 * (200*100)	238	135	132	17
800 * (400*100)	476	270	263	29
800 * (800*100)	956	610	526	56
100 * (100*100)	121	75	68	11
100 * (100*200)	239	146	133	17
100 * (100*400)	477	275	266	30
100 * (100*800)	956	533	532	57

Tabela 1: Časi izvajanja v odvisnosti od velikosti reševanih problemov pri različnih načinih izvajanja (glej opredelitve pod grafi)

N - velikost reševanega problema = število generacij * (W * H)

Analiza meritev

S = T(sek) / T(p)

S - pohitritev algoritma, kjer je** T(sek) **čas izvajanja sekvenčnega programa in** T(p) **čas izvajanja paraleliziranega programa nad** p **nitmi.

	OpenCL
N	S
100 * (100*100)	11
200 * (100*100)	10.9
400 * (100*100)	10.8
800 * (100*100)	9.6

V primerjavi z vsemi prejšnjimi paraleliziranimi algoritmi, je seveda tu opisana paralelizacija algoritma znatno najhitrejša od ostalih, saj imamo na GPE na voljo zelo veliko procesorskih enot, saj število slednjih zagotavlja zelo hitre rezultate.

Viri

- https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_automaton
- https://en.wikipedia.org/wiki/Conway's_Game_of_Life
- https://www.youtube.com/watch?v=R9Plq-D1gEk

- https://computing.llnl.gov/tutorials/pthreads/
- https://computing.llnl.gov/tutorials/openMP/
- https://www.khronos.org/opencl/
- https://www.libsdl.org/