

Изследване на скалируемостта на Wa-Tor
симулацията при статична декомпозиция на
домейна

Иван-Асен Веселинов Чакъров
ФН: 81837, Курс: 3, Група: 1

6 юли 2021 г.

Съдържание

1	Увод	3
2	Правилата на света Wa-Tor	4
3	Инструкции за употреба на проекта	5
4	Описание на паралелния алгоритъм	6
5	Архитектура	8
6	Тестови резултати	12
7	Визуализации	17
8	Бъдещо развитие на проекта	18

1 Увод

Wa-Tor [2] е класически проблем при паралелното програмиране. Накратко задачата е симулирането на идеализиран двумерен свят с формата на тор. Светът има два вида обитатели - херинги, които играят ролята на плячка и акули, които ловят и изяждат херингите.

Декомпозицията на домейна (Domain decomposition) [3] при паралелното програмиране се явява естествен подход при решаването на проблеми, при които за решаването на проблема за даден елемент D от домейна са нужни само малко подмножество от данни, които са "близо" до D . Накратко, идеята е, че разбиваме домейна на множество поддомейни и възлагаме решаването на проблема за всеки поддомейн на отделен процес. Важно е отделните поддомейни да са със еднаква големина за да може да се разпредели хубаво работата между процесите. Съществуват два вида декомпозиция - статична и динамична. При статичната в началото на алгоритъма разбиваме домейна и разпределяме работата между процесите. По време на симулацията разбиването не се променя, което може да води до намаляване на производителността тъй като данните при доста алгоритми прескачат от един поддомейн в друг. Този проблем се решава от динамичната декомпозиция, която по време на симулацията преизчислява разбиването на домейна с цел балансиране на големината на отделните поддомейни. Декомпозицията на домейни намира приложение при решаването на проблеми от тип Cellular automata [4].

Тъй като и Wa-Tor попада в този тип проблеми, решението което представяме тук е базирано на статична декомпозиция на домейна.

2 Правилата на света Wa-Tor

Светът на Wa-Tor се намира на повърхността на Тор (или поничка). Цялата повърхност е покрита с вода и единствените обитатели на този свят са херингите, които играят ролята на плячка и акулите, които ловят плячката. Позициите, които заемат рибите (да, акулите са риби) са дискретни и могат да се изобразят с двумерна матрица. Времето тече под формата на дискретни итерации, като на всяка итерация дадена риба променя позицията си, изяжда друга риба, умира или ражда нова себеподобна риба. Точните правила, по които това става са следните:

Движение:

- Херинга: Избира случайна съседна (горна, долна, лява или дясна) свободна клетка и се премества в нея.
- Акула: Избира случайна съседна клетка с херинга в нея и ако намери такава се мести там и изяжда херингата, а ако няма съседна клетка с херинга се мести на случайна съседна клетка.

Умиране:

- Херинга: При нашата имплементация херингите са безсмъртни. Единственият начин да умрат е ако бъдат изядени от акула. В такъв случай биват изтрети от Света. Възможно е да се направи вариант, в който да имат краен живот, в който на всяка итерация губят по една точка енергия и ако стане тя 0 - умират.
- Акула: На всяка итерация ако не изяде някоя херинга губи по една точка енергия. Ако енергията стане 0 умира и бива изтрита от света на Wa-Tor. Ако изяде херинга на дадена итерация и се добавя една точка енергия.

Размножаване:

Еднакво за всички риби. Всяка риба има възраст - число, което започва от 0 при раждане и на всяка итерация се увеличава с 1. Когато дадена риба стигне "максималната възраст" и се нулира възрастта и на старата и позиция се създава нова риба от същия тип (херинга или акула), която е с възраст 0. Възможно е "максималната възраст" да е различна за акулите и херингите.

В интернет има най-различни разновидности на тези правила. Най-вероятно това е, защото в първоизточникът [2] правилата не са описани особено формално и, защото много различни имплементации си добавят или променят правила. Има варианти на симулацията, в които и херингите се хранят - с планктон примерно. Нашата имплементация, обаче е базирана на горе описаните правила и изследва скалируемостта на симулацията спрямо тях.

3 Инструкции за употреба на проекта

Програмата се разпространява по 2 основни начина:

- Linux container (Docker): В този вид програмата носи със себе си всички неща на които зависи. За да се пусне на дадена машина трябва да има инсталиран Docker. Това е и използваният начин за изкарването на тестовите резултати.
- Java JAR: Стандартен начин за разпространение на Java базирани програми. Особеност е, че проектът е разработен на Java 16, като използва и експериментални функции на езика, така че препоръчаният начин за използване е през Linux container-a.

Примерни команди в Bash за пускане на програмата:

```
1 docker run -e ARGS='
2   $threads \
3   $iterations \
4   $sharks \
5   $fish \
6   $height \
7   $width' \
8   ivanasen-wator:0.0.1
```

Listing 1: Пускане на програмата през Docker

```
1 java -jar ivanasen-wator.jar \
2   $threads \
3   $iterations \
4   $sharks \
5   $fish \
6   $height \
7   $width
```

Listing 2: Пускане на програмата директно през Java

Значение на аргументите:

- \$threads: Брой нишки
- \$iterations: Брой итерации, през които да мине симулацията
- \$sharks: Брой акули
- \$fish: Брой херинги
- \$height: Височина на полето
- \$width: Широчина на полето

Пример за резултатът от изпълнението, който се изкарва на стандартния изход:

```
1 NThreads: 1
2 Iterations: 100
3 Shark count: 10000
4 Fish count: 1000000
5 Height: 6000
6 Width: 3000
7 Execution time millis: 400143
```

Интересният ред е Execution time millis - времето за изпълнение в милисекунди прекарано изпълнявайки симулацията от началото на работата на първата *Worker* нишка до края на изпълнението на последната. Повече за *Worker* нишките обясняваме във следващата секция.

4 Описание на паралелния алгоритъм

Алгоритъмът, който ползваме се базира на статична декомпозиция на домейна. Начинът, по който работи е следният. Да кажем, че искаме да изпълним алгоритъма с N на брой нишки. Разбиваме полето на N на брой непрекъснати участъка (поддомейна) по редове като гледаме големината им да е еднаква. Ако височината H не се дели точно на N прибавяме остатъка към последния поддомейн. След това възлагаме всеки поддомейн на отделна нишка, която си изчислява симулацията само за него. Друг подход за разбиване би бил по "правоъгълници тоест да имаме по няколко поддомейна на ред. Изборът да го направим по редове е по 2 причини. Едната е, че така всеки поддомейн си комуникира само с 2 съседа вместо с 4, което намалява времето за комуникация между отделните нишки, а втората причина е, че този алгоритъм е по-прост за реализация.

След като сме разпределили поддомейните на нишките начинът, по който те си синхронизират работата е следния. Всяка нишка обработва своя участък по редове, като започва от най-горния. След като го обработи изпраща съобщение, че е свършила работа по него на нишката, която отговаря за съседния горен участък. След това обработва вътрешните си редове без да праща никакви съобщения на никого, подобно на еднонишкова имплементация. Преди да стигне най-долния ред изчаква да получи съобщение от нишката отговаряща за съседния долен участък, че си е свършила работа по нейния пръв ред. След като го е получила завършва с обработката и на последния ред. Така завършва една итерация от Wa-Tor симулацията за една нишка. След това нишката продължава със следващата итерация, пак започвайки от първия ред.

В нашата имплементация на този алгоритъм използваме нишки, семафори и споделена памет за комуникация. Следва псевдокод на стъпките, които изпълнява една нишка за една итерация:

Нека $rowMutex[i]$ е семафор с начална стойност 1 за $i \in 1 \dots N$. Този семафор играе ролята на мютекс за достъп до даден ред на полето с номер i . Нека $isUpdated[i]$ е семафор с начална стойност 0 за $i \in 1 \dots N$. Отново тези семафори са номерирани по редовете на полето. Служат за уведомяване, че първия ред от участъка на дадена нишка е обработен. Нека $startRow$ и $endRow$ са съответно номера на първия и последния ред, който дадена нишка трябва да обработи.

```

for  $i \leftarrow startRow; i \leq endRow; i \leftarrow i + 1$  do
   $nextRow \leftarrow (i + 1) \% N$ 
  if  $i = startRow$  then
    ACQUIRE( $rowMutex[i]$ )
  else if  $i = endRow$  then
    ACQUIRE( $isUpdated[nextRow]$ )
    ACQUIRE( $rowMutex[nextRow]$ )
  end if
  UPDATESTATEFORROW( $i$ )
  if  $i = startRow$  then
    RELEASE( $rowMutex[i]$ )
    RELEASE( $isUpdated[i]$ )
  else if  $i = endRow$  then
    RELEASE( $rowMutex[nextRow]$ )
  end if
end for

```

Както виждаме този псевдокод е малко по-формална версия на алгоритъма, който описахме с думи.

Друго интересно нещо при алгоритъма ни е начинът по който представяме двумерния свят, в който се намират обитателите на Wa-Tor. Освен, че използваме двумерна матрица за представянето на клетките имаме и масив от свързани списъци от класа *Creature*, който представлява обитателите на даден ред от полето. Тоест ако искаме да обработим даден ред ние трябва да итерираме свързания списък. Това спестява много посещения на празни клетки, които имплементацията само със двумерна матрица прави.

Цялостно, алгоритъмът като имплементация е подобен на този във [1], но е опростена версия, тъй като използва статична декомпозиция на домейна, т.е. не правим никакъв Load balancing по време на изпълнение и само разбиваме домейна в началото.

5 Архитектура

Решението е имплементирано на Java 16 и използва вградените способности за паралелно програмиране използвайки нишки и споделена памет:

- Thread: Класът за нишка в Java
- ExecutorService: Управлява множество нишки в даден Thread pool
- ReentrantLock: Мютекс
- Semaphore: Семафор

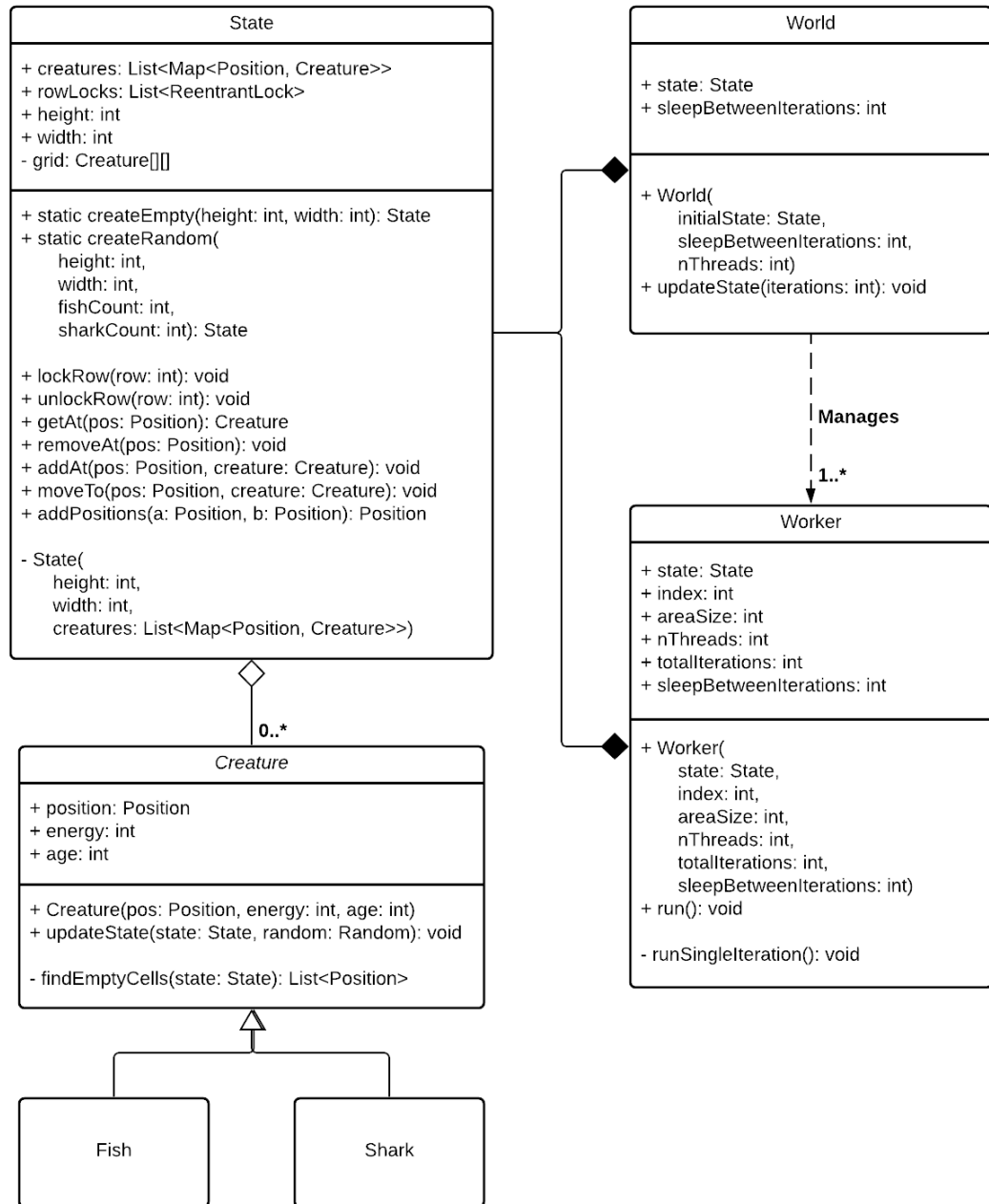
Важно е да отбележим, че при имплементацията на JVM, която ползваме (OpenJDK 16) нишките са истински на ниво операционна система, тъй като има стари версии на JVM и нови разработки като Project Loom, при които се използва тъй наречения Green Thread модел, при който нишките се менажират от самата JVM и позволяват мултиплексиране на много JVM нишки върху една ОС нишка.

Архитектурата на проекта използва статична декомпозиция на домейна и е направена по модела Master-Slaves, тъй като имаме една главна нишка, която управлява множество Worker нишки, които извършват изчисленията необходими за симулацията.

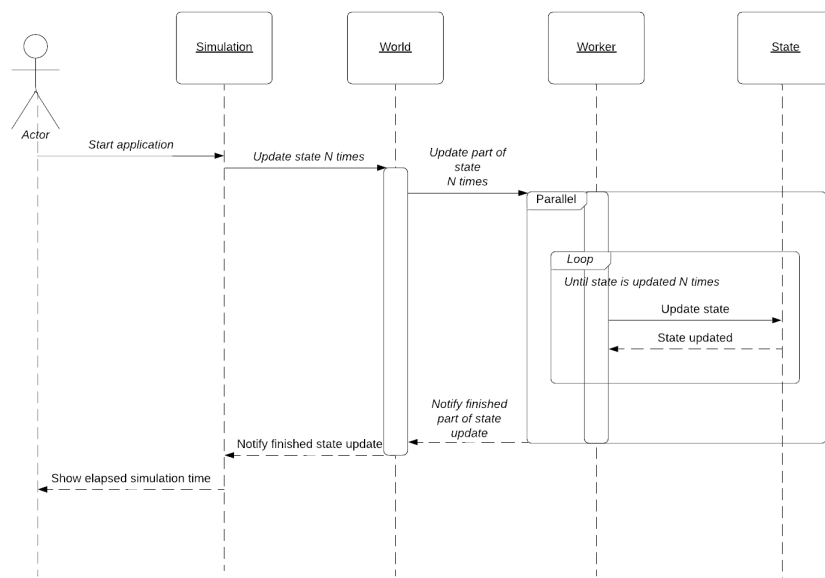
Ще отбележим по-важните класове на програмата:

- Creature (и наследниците му Fish и Shark): В Creature е общата логика за това как се държи даден обитател в нашия свят. Fish и Shark съдържат специфичните правила, по които се движат по полето.
- State: Представява имплементацията за състоянието, в което се намира нашия свят.
- Worker: Този клас имплементира Runnable. Той представлява кода, който се изпълнява от една нишка върху даден участък от света. Инстанциите на класа играят ролята на slaves в нашия модел.
- World: Този клас играе ролята на Master. В него се съдържа логиката за създаването и управлението на отделните Worker-и използвайки ExecutorService.
- Simulation: Създава World и мери времето за изпълнение на N на брой итерации на State.
- GuiSimulation: Създава World и показва в графичен вид в реално време как тече симулацията. Тук използваме Java Swing и AWT за целта.

На следващата страница представяме UML клас диаграма на проекта.



Фигура 1: UML Клас диаграма на проекта



Фигура 2: UML Sequence диаграма на проекта

Text here

6 Тестови резултати

Характеристики на тестовата машина:

- Процесор: 2 x Intel® Xeon® CPU E5-2660 0 @ 2.20GHz - Всеки процесор е с по 8 ядра и 2 нишки, това прави 16 ядра общо и 32 нишки (по 2 нишки на ядро благодарение на Hyperthreading).
- Памет: 64Gb, 32K L1d и L1i кешове, 256K L2 кеш и 20480K L3 кеш

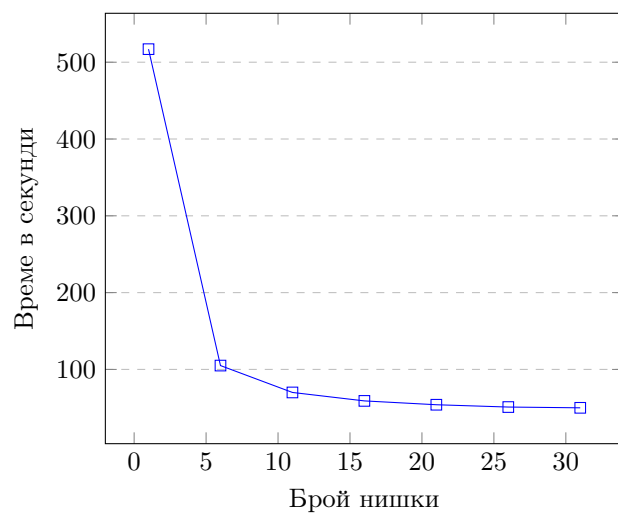
Взимайки в предвид броя на нишките на машината има смисъл да тестваме скалируемост с до 32 паралелно работещи процеса/нишки.

Начинът по който са получени резултатите е следният. Пускаме симулацията да върви за N итерации и засичаме времето от началото на работата на всички нишки до края на работата на последната. Правим отделни измервания от 1 до 32 нишки, като правим по 5 за всеки K на брой нишки. След това смятаме минимума, максимума и средното аритметично на получените резултати.

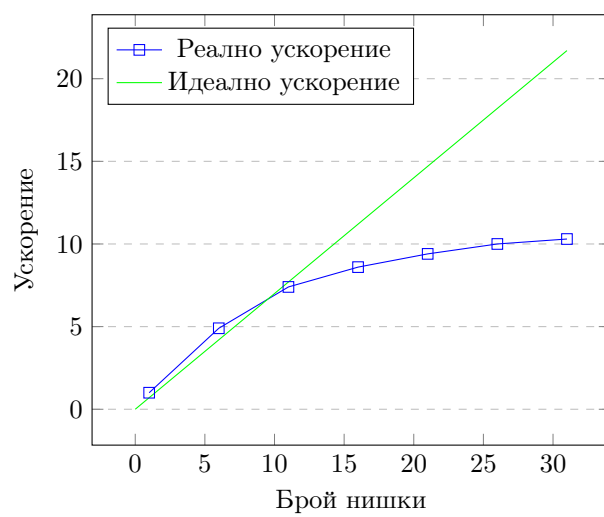
Тестове при размер на полето 2000x1000 и популация 50 000									
#	p	$T_p^{(1)}$	$T_p^{(2)}$	$T_p^{(3)}$	$T_p^{(4)}$	$T_p^{(5)}$	T_p	S_p	E_p
1	1	87521	85238	88839	88392	83791	83791	1.00	1.00
2	2	43636	43001	42122	42790	42451	42122	1.98	0.99
3	4	23608	23848	23023	21739	23980	21739	3.85	0.96
4	8	15380	15380	17515	17541	22925	15380	5.44	0.68
5	12	12934	10676	10307	9834	9906	9834	8.52	0.71
6	16	9089	9315	9004	9134	9245	9004	9.31	0.58
7	20	8826	9019	8913	9056	9033	8826	9.49	0.47
8	24	8716	8628	9207	9010	8833	8628	9.71	0.40
9	28	9462	9054	9910	9264	9493	9054	9.25	0.33
10	32	10150	9903	10275	10361	9935	9903	8.46	0.26

Тестове при размер на полето 8000x4000 и популация 1 000 000									
#	p	$T_p^{(1)}$	$T_p^{(2)}$	$T_p^{(3)}$	$T_p^{(4)}$	$T_p^{(5)}$	T_p	S_p	E_p
1	1	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
2	6	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
3	11	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
4	16	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
5	21	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
6	26	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
7	32	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
8	24	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
9	28	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1
10	32	1.00	1.00	1	1	1	1	1	1

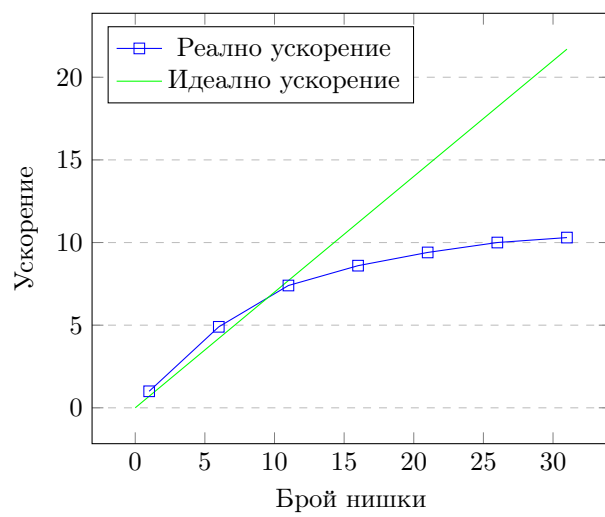
Време за изпълнение при размер на полето 4000x2000



Средно ускорение при размер на полето 4000x2000



Средно ускорение при размер на полето 4000x2000

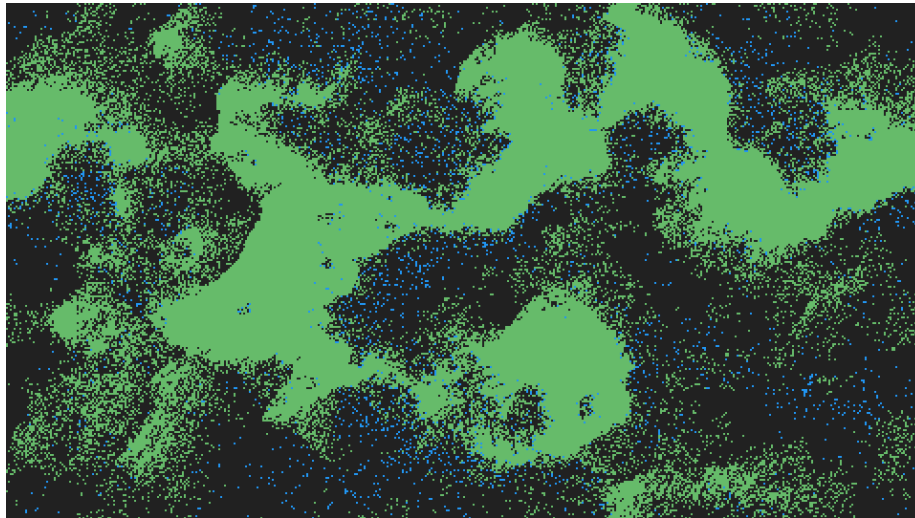


Testing...

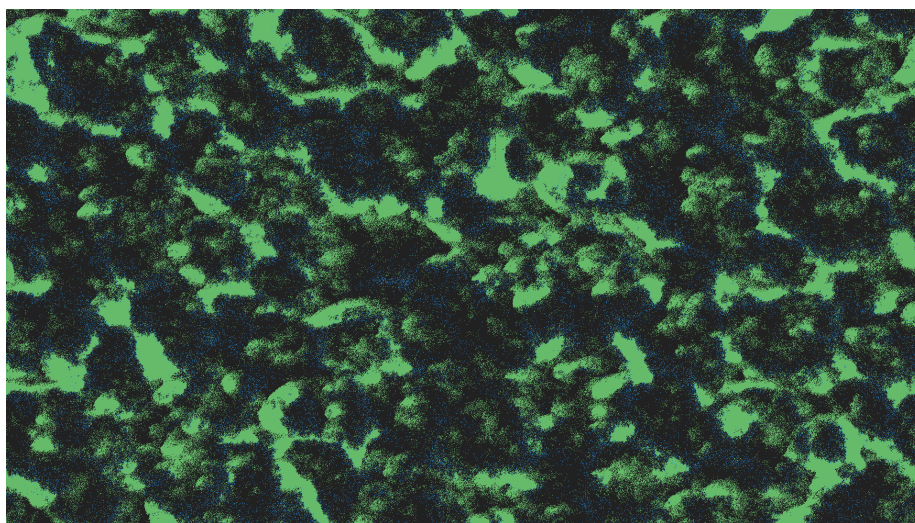
Testing...

7 Визуализации

Освен симулацията, която служи за измерване на скалируемостта, в проекта е разработена и визуализация в реално време с помощта на Java Swing и AWT. Следват няколко екранни снимки от визуализации (херингите са в зелено, а акулите в синьо):



Фигура 3: Размер на полето 480x270, 10 000 херинги и 1000 хиляди акули



Фигура 4: Размер на полето 1920x1080, 1 000 000 херинги и 100 000 акули

Първоначалната цел на този "режим на работа" беше лесен начин за дебъгване, но в крайна сметка се получи и доста готина анимация, която би могла да се ползва за screensaver :).

8 Бъдещо развитие на проекта

Резултатите, които са получени при статична декомпозиция на домейна са сравнително хубави, но е възможно да се подобрят с използването на динамична декомпозиция, тоест да правим load balancing на отделните домейни по време на изчисленията. Това помага особено при по-голям размер на полето. Примерни резултати за това какво може да бъде постигнато при използването на такъв тип алгоритъм са дадени във [1] използвайки алгоритъм наречен "Bounded neighbours".

Литература

- [1] F. Baiardi, A. Bonotti, L. Ferrucci, L. Ricci, and P. Mori. Load balancing by domain decomposition: the bounded neighbour approach. In *In Proc. of 17th European Simulation Multiconference*, pages 9–11, 2003.
- [2] Alexander Keewatin Dewdney. Sharks and fish wage an ecological war on the toroidal planet wa-tor. *Scientific American*. pp. 14–22, 1984.
- [3] William Gropp. Parallel computing and domain decomposition. *Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations* (pp. 349–361), 1992.
- [4] Peter Sloot and D.Talia. Cellular automata: promise and prospects in computational science. *Future Generation Computing Systems*, 1999.