VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Simulace davu

Crowd Simulation

2018 Adam Lasák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Lasák**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika

Téma: Simulace davu
Crowd Simulation

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V dnešní době stále přibývá důvodů, proč se zaobírat tématem počítačové simulace davu agentů a možnosti využití se stále rozšiřují. Dnes se již simulace davu využívá např. při testování návrhů veřejných budov nebo při vytváření animací davových scén ve filmu.
Cílem této práce je vytvořit grafickou testovací aplikaci, ve které bude možno simulovat, testovat a porovnávat chování davu s možnosti nastavení a úpravy zadání, včetně možnosti zasáhnout do chování agentů.

1. Nastudujte teorii zabývající se chováním davu, zaměřte se na algoritmy počítané v reálném čase (např. model Boids).
2. Popište základní algoritmy používané pro simulaci davu.
3. Vytvořte aplikaci simulující chování davu včetně vizualizace jednotlivých agentů.
4. Vytvořte praktické ukázky a jednotlivé testy srovnejte a vyhodnoťte.

Seznam doporučené odborné literatury:

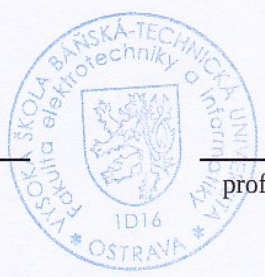
[1] Craig Reynolds: "Boids Background and Update",[online], http://www.red3d.com/cwr/boids/
[2] Addison-Wesley: "OpenGL Programming Guide",(Red book) [online].

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Němec, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Jan Platoš, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 1. dubna 2018 .....

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu, Ing. Martinu Němcovi, Ph.D., za poskytnuté odborné rady, za neocenitelné zkušenosti a za všechen čas, jenž mi takto věnoval.

Abstrakt

Spousta věcí v přírodě je stejně působivých jako zvířata, která se mohou organizovat do větších a logicky orientovaných seskupení. Tím že dokážeme simulovat toto chování, můžeme vytvořit reálnou podobu davu. Toho se hojně využívá např. ve filmech, hrách či návrhu budov. Tato práce se zaměřuje na popis boidova algoritmu, který je dnes nejpoužívanější co se simulace davu týče.

Klíčová slova: Boidův algoritmus, dav, hejno, koheze, separace, zarovnání, agent

Abstract

Many things in nature are impressive like animals which can be organized into larger and logical oriented grouping. In that case when we can simulate the behavior, we can create real crowd form. This can be useful f.e. in movies, games or for building design. This thesis focuses on the description of boid's algorithm which is the most used crowd simulation principle today.

Key Words: Boid's algorithm, crowd, flock, cohesion, separation, alignment, agent

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů

ACM	–	Association for Computing Machinery - vědecky-vzdělávací instituce pro výpočetní technologie
AI	–	Artificial Intelligence - umělá inteligence
FPS	–	Frames per seconds - počet snímku za jednu sekundu
GLEW	–	OpenGL Extension Wrangler Library - poskytuje realtime prostředky pro danou platformu
GLFW	–	Graphics Library Framework - Multiplatformní technologie rozšiřující OpenGL o vytváření aplikačních oken
GLM	–	OpenGL Mathematics - poskytuje širokou škálu matematických operací pro OpenGL
GPU	–	Graphics processing unit – grafická karta, má svůj procesor i výpočetní paměť
IDE	–	Integrated Development Environment - program usnadňující práci programátorům
RAM	–	Random Access Memory – operační paměť počítače
Realtime	–	Vykreslování v reálném čase – snaha vykreslovat co nejrychleji
SIGGRAPH	–	Special Interest Group on Computer GRAPHics and Interactive Techniques - výroční konference v počítačové grafice

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam výpisů zdrojového kódu

1 Úvod

Simulační algoritmy se používají v širokém spektru odvětví od vědy, her, výpočetních úkonů až po kinematografii či stavbu budov [7]. Herní využití mívá velmi reálně implementována armáda [9], která tímto způsobem zaškoluje vojáky ve virtuálním simulačním boji jak v taktice, tak způsobu nejefektivnějšího využití dostupných zbraní.

Pokud vememe v potaz stavbu či projektování budov, nabízí se další subspektra druhů simulačních programů. Například projektant potřebuje nasimulovat jak velkou zátěž udrží hlavní nosníky, testování a simulování různých druhů materiálů či jak velké budou úniky tepla.

Avšak po této základní konstrukční stránce, se musí také navrhnout optimální velikost budovy a kolik bude schopna pojmout lidí v jednom okamžiku. Kde bude vést úniková cesta v případě požáru a kolik času zabere davu, než se z budovy dostane ven. A zrovna co se bezpečnosti týče, mají simulační algoritmy nejširší využití. V jistém slova smyslu by se dalo říci, že byly vytvořeny primárně pro tento účel [1].

Při těchto simulacích se tak navrhují nejlepší varianty šířky chodeb, dostupnosti k únikovým východům, přístupu k požárnímu schodišti nebo vyladění ukazatelů směru úniku.

Pokročilejší algoritmy také reagují na různé překážky, jak horizontální tak vertikální. Dokáží simulovat dav který jde z jednoho patra do druhého různými typy cest a střetává se tak s jinými davy. Cílem projektanta je pak vybrat vhodné únikové cesty z budovy a zpracovat nejoptimálnější únikový plán.

V této práci se seznámíme se základy simulování davu a hejna. Popíšeme nejpoužívanější algoritmus [2] pro tento druh simulace a realizaci výsledné aplikace.

2 Simulace

Pojem simulace lze shrnout do obecné věty: *"Počítačová simulace je napodobení skutečnosti pomocí numerického výpočtu, nezbytná součást modelování fyzikálních procesů. Dokáže předpovědět jak kvantitativní, tak kvalitativní výsledky pokusů při různých počátečních podmínkách. Umožňuje omezit výběr jevů, které celý pokus ovlivňují nejvíce a tím vysvětlit příčiny a podstatu procesů."* (Citace [6])

V našem případě se jedná o napodobení davu, kdy pomocí algoritmu dokážeme předem modifikovat nadcházející krok a tím i změnit výsledné chování celého davu. Na základě vstupních dat nebo kombinací pravidel můžeme chování měnit a tím simulovat dav při různých situacích, jako je evakuace z budovy nebo běžné chození po prostorách nákupního střediska.

2.1 Simulace davu

Simulaci davu lze zrealizovat dvěmi metodami. Částicová simulace a simulace založená na umělé inteligenci. [13]

2.2 Částicová simulace

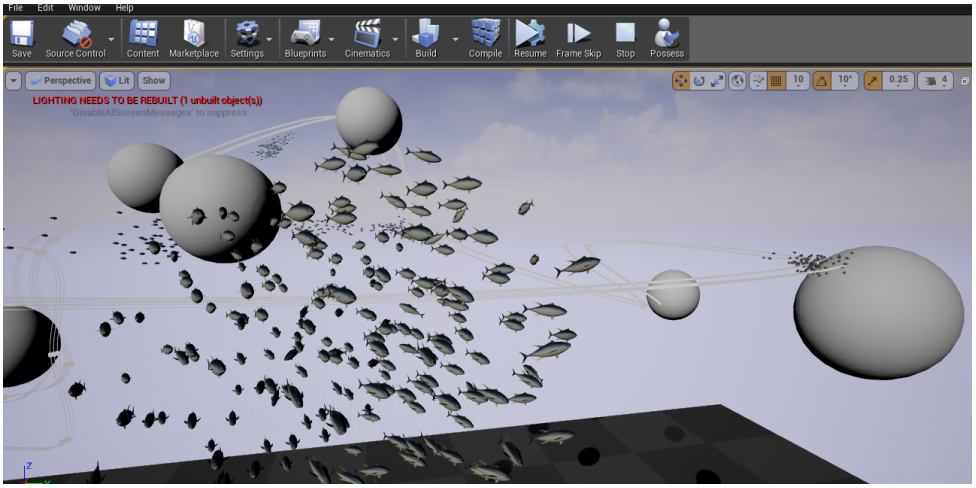
První zmíněná simulace je založena na principu přiřazení hmotného bodu každému prvku z množiny všech prvků které mají spolu iterovat[1]. Hlavní výhodou využití tohoto typu simulace je možnost použití velkého množství prvků z celkové množiny, neboť výpočty základních sil nejsou příliš náročné na výpočetní výkon. Příklady pro využití jsou typy založené na: magnetických silách, buněčném modelu a sociálních silách. [13]

2.3 Simulace na bázi AI (Artificial Intelligence)

Druhý zmíněný typ je založen na bázi Agentů. Ti už nejsou reprezentováni jen obyčejnými silami *(i přesto že se jedná o diametrálně odlišný typ simulace davu, určité fyzikální vlastostni agenti stále musí mít)* ale také přidanými vlastnostmi, kterými předchozí typ tolik nedisponoval. Mají hlavně přidané senzory, díky nímž dokáží vyhodnocovat danou situaci v reálném čase a následně se rozhodovat k dalšímu nejvýhodnějšímu kroku. Pokud do scény vložíme dva a více agentů kteří budou na sebe reagovat, můžeme říci že každý z nich má v jisté míře svůj mozek. Ať už jednodušší *(rozhodování dalšího kroku mezi zdmi)* nebo složitější *(např.: agent může v danou chvíli reagovat zda-li má jít rychleji či pomaleji aby nezpůsobil kolizi s jiným agentem či agenty)*.

Tento typ simulace hojně využívá herní průmysl, kdy v nějaké scéně - herní mapě, jsou nasazeny desítky agentů kteří se ve své podstatě starají sami o sebe a přímo či nepřímo komunikují s uživatelem. Obecně však platí že ve hrách je tato implementace mnohonásobně složitější

[1] Iterace je v programování proces při kterém se soubor pokynů opakuje přesně daným počtem opakování, nebo dokud je splněna podmínka.[10]



Obrázek 1: Ukázka simulace hejna ryb v Unreal Enginu 4 (Zdroj: [3])

než částicová simulace kvůli mnoha vlastnostem agentů. Konkrétními případy může být třeba hra Crysis *(leden 2007 - stáda jelenů)* a FarCry *(2004 - hejna tropických papoušků)*.

Je třeba také zminit kinematografický průmysl, který simuluje davy lidí. Tím pádem animátorům odpadne kus práce kdy by museli každého agenta animovat zvlášť.

Jelikož byl v této práci využit tento typ simulace, tak v dalších kapitolách budeme každý bod ve scéně nazývat agentem.

2.4 Craig Reynoldův algoritmus

Nejčastějším typem simulace založené na umělé inteligenci je Craig Reynoldův algoritmus vytvořený v roce 1986 a oficiálně představený roku 1987 na konferenci ACM SIGGRAPH [11, 12].

Nejčastěji se však setkáme s názvem Boidův algoritmus, který je odvozen od boidů *(boids)* čili alternativnímu názvu agentů. Jak již bylo zmíněno výše, simulace založená na umělé inteligenci obsahuje základní prvky částicové simulace, ale má také něco navíc. Výjma senzorů mají také přehled o celkové geometrii celé scény. Tzn. že každý agent *(boid)* má přehled o všech agentech v celé scéně. Pokud bychom tedy maximalizovali důležitá tři pravidla tohoto principu popsané níže, znamená to, že každý iteruje s každým.

Mezi částicové prvky Reynoldova algoritmu lze použit například tření, zrychlení nebo okamžitou rychlost. Reálně lze tření ještě rozdělit na tření válcove, tření způsobené protivětrem nebo pokud bychom určili jako objekt auto, můžeme použít další fyzikální vlastnosti jako točivý moment případně brzdná dráha.

Existuje však celá řada vylepšení která se dají s tímto algoritmem provést, například simulace chování dopravy. Ta funguje jako tzv. chování založeného na řízení *(Steering behaviors)* [14].

V této práci byla tato vylepšení použita čímž lze chování davu více přiblížit realitě. Přidané fyzikální veličiny jsou již zmíněné: tření, zrychlení a okamžitá rychlost.

Následuje popis Reynoldova algoritmu, který obsahuje tři základní vlastnosti:

1. Separace *(Separation)*
2. Zarovnání *(Alignment)*
3. Koheze[2] *(Cohesion)*

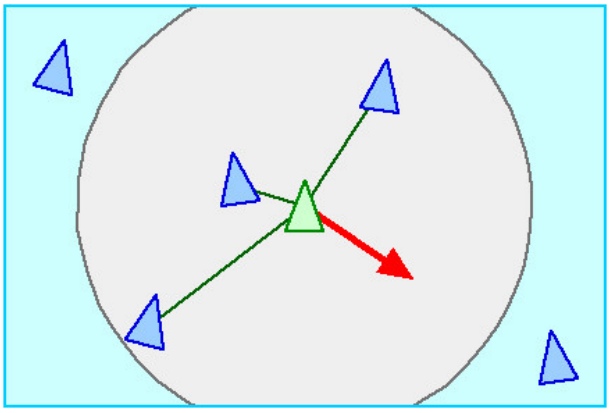
2.5 Separace

Separace slouží k tomu, aby se dva a více agentů nepřiblížili příliš blízko sebe a tím vyvolali kolizi mezi sebou. Je to první a nejzákladnější vlastnost Reynoldova algoritmu bez které by nebylo možné vytvořit kompletní simulaci.

Oddělení od ostatních agentů funguje na principu základních operací s vektory *(2D nebo 3D)* a vytvoření pomyslného kruhu kolem každého agenta, který jej upozorní zda-li není příliš blízko jiného agenta.

Následující kroky provedou separaci agentů:

1. Odečtení vektoru agenta od vektoru aktuálně kontrolovaného agenta.
2. Normalizování výsledného vektoru z předhozího kroku.
3. Vydělení výsledku kroku č. 2 vzdáleností těchto dvou agentů. Výsledek se přičítá k výslednému vektoru.
4. Pokud je v okolí agenta více agentů se kterými koliduje, pak se na konci výsledný vektor vydělí počtem těchto agentů (viz obrázek č. 2).



Obrázek 2: Separace - vyhýbání se ostatním agentům (Zdroj: [2])

[2]Koheze je fyzikální síla držící pohromadě atomy či molekuly téže látky či tělesa (zejména kapalného a pevného tělesa), pozn. upraveno [15]

```
function Separation(boid paramBoid)
{
   Vector result
   int count

   for (b in allBoids) {
      if (b != paramBoid){
         distance = distanceBetween(b, paramBoid)
         if (distance < SEPARATION_DIAMETER){
            sub = substractVectors(b, paramBoid) // b - paramBoid
            normalize(sub)
            divideScalar(sub, distance) // sub / distance
            result = result + sub
            count = count + 1
         }
      }
   }

   return divideScalar(result, count) // result / count
}
```

Výpis 1: Pseudokód pro separaci

2.6 Zarovnání

Dalším důležitým pravidlem pro fungování boidova algoritmu je zarovnání. Spolu se separací bez koheze má dav již základní podobu chování.

Zarovnání má za úkol soudržnost. Všem agentům ve scéně poskytuje schopnost sladit se, jak je zobrazeno na obrázku č. 3.

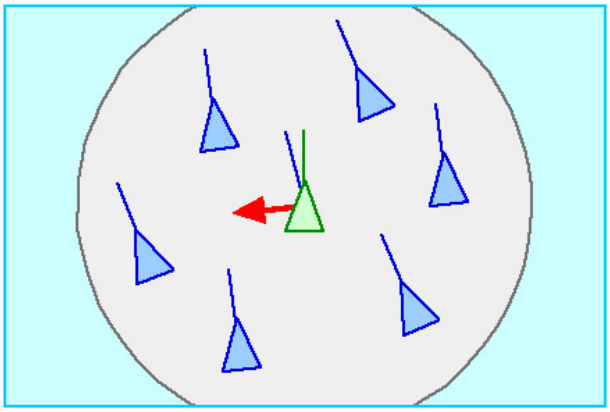
Princip fungování je obdobný jako u separace, pokud se v blízkosti okruhu od daného agenta objeví jiný agent případně agenti, zprůměruje se jejich rychlost a směr a na základě těchto údajů modifikujeme údaje konkrétního agenta a tím zajístíme soudržnost všech dohromady.

Pokud bychom chtěli aplikovat zarovnání a konkretizovat průběh, musíme se držet těchto kroků:

1. V cyklu, který prochází všechny agenty ve scéně se testuje vzdálenost konkrétního agenta od jiného, který je momentálně v dané iteraci cyklu pod určitým indexem. Pokud je tato vzdálenost menší než průměr kruhu, přičtou se souřadnice vektoru daného agenta k lokálnímu sumárnímu vektoru *sum*.

2. Jestliže se podmínka nesplnila a tudíž sumární vektor *sum* je roven nule pak se pravidlo zarovnání ukončuje. Pokud se alespoň jednou podmínka v kroku č. 1 provedla tak následují kroky:

   - sumární vektor *sum* se vydělí skalární[3] hodnotou rovné počtu splněných podmínek v kroku č. 1
   - normalizování sumárního vektoru *sum*
   - vypočtení výsledného vektoru dle kterého se upraví směr daného agenta vzorcem $vRes = sum - vel$, kde *sum* je sumární vektor a *vel* je aktuální rychlost agenta.



Obrázek 3: Zarovnání - určení směru agenta vůči průměrnému směru ostatních (Zdroj: [2])

```
function Alignment(boid paramBoid)
{
   Vector sum
   int count

   for (b in allBoids) {
      if (b != paramBoid){
         distance = distanceBetween(b, paramBoid)
         if (distance < ALIGNMENT_DIAMETER){
            sum = sum + b.velocity
            count = count + 1
         }
      }
   }
```

[3]Skalár je veličina, která je určená pouze svojí velikostí, tj. její hodnota je popsána jediným číslem (skalární veličiny ve fyzice jsou např. hmotnost, objem, teplota). (Citace [16])

```
    if (count > 0){
        divideScalar(sum, count) // sum / count
        normalize(sum)
        return substractVectors(sum, velocity) // sum - velocity
    } else {
        return sum
    }
}
```

Výpis 2: Pseudokód pro zarovnání

2.7 Koheze

Při simulaci pomocí Reynoldova algoritmu pomocí třech pravidel je koheze tím nejméně důležitým pravidlem. Pokud bychom aplikovali pouze dvě předchozí pravidla a sice separaci a zarovnání, pak by výsledek už vykazoval známky chování davu.

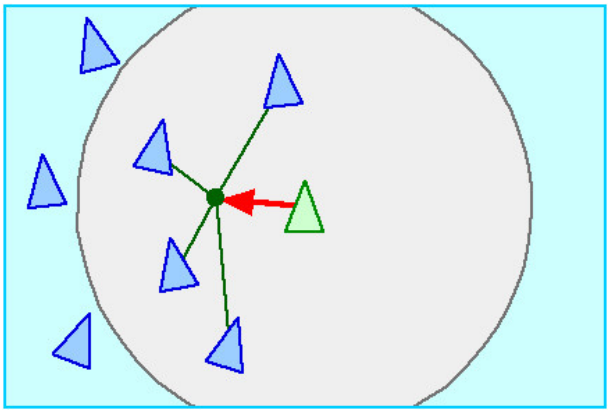
Funguje na principu spojení okolních agentů *(a následně vytvoření skupiny)*, kteří zasahují do dalšího pomyslného kruhu. Aby toto pravidlo fungovalo správně a nekolidovalo s podmínkami separace pak musí platit $constCoh > constSep$, kde $constSep$ je maximální průměr kružnice ve které se při překročení tohoto průměru řeší podmínky separace a $constCoh$ je maximální průměr kružnice u koheze. Pokud by podmínka byla opačná, koheze se provede špatně nebo vůbec. Průměry kružnic koheze a zarovnání však na sebe vliv nemají.

Ve výsledné fázi se tedy musí určit průměrná lokace mezi všemi agenty kteří spadají do okruhu daného *(aktuálně kontrolovaného)* agenta. Ve chvíli kdy se tyto souřadnice zjistí, agent na ně začne směřovat.

Následují dvě základní operace které provedou změnu směru daného agenta k průměrné lokaci ostatních agentů, kteří jsou v jeho okruhu.

1. Hlavní cyklus který prochází všechny agenty ve scéně a kontroluje vzdálenosti ostatních agentů vůči konkrétnímu agentovi. Pokud libovolný agent spadá do okruhu nějakého konkrétního, opět se přičítá k sumárnímu vektoru *sum* avšak ne rychlost, ale lokace blízkého agenta.

2. Následně se provede tentýž krok jako u zarovnání, čili sumární vektor *sum* se vydělí skalárem počtu splněných podmínek v kroku č. 1



Obrázek 4: Koheze - určení směru k průměrné lokaci okolních agentů (Zdroj: [2])

Kód v následujícím pseudokódu je obdobný jako kód zarovnání výjma řádku s normalizováním sumárního vektoru, avšak v implementační části je tento kód složitější v řádku vracení výsledné hodnoty, kdy se ještě řeší fyzikální vlastnosti.

```
function Cohesion(boid paramBoid)
{
   Vector sum
   int count

   for (b in allBoids) {
      if (b != paramBoid){
         distance = distanceBetween(b, paramBoid)
         if (distance < COHESION_DIAMETER){
            sum = sum + b.location
            count = count + 1
         }
      }
   }

   if (count > 0){
      divideScalar(sum, count) // sum / count
      return physicalProperty(substractVectors(sum, velocity))
   } else {
      return sum
   }
}
```

Výpis 3: Pseudokód pro kohezi

2.8 Aplikování tří pravidel

Ke kompletní simulaci dojde ve chvíli spojením třech výše zmíněných pravidel. Technicky vzato se jedná o sečtení všech třech výsledných vektorů z každé ze tří metod a rychlosti daného agenta který je aktuálně v iteraci. Nejdříve se sčítají rychlosti a poté se z této sumy spočítá výsledná pozice (Výpis pseudokódu č. 4).

Avšak pravidel je možné použít více, jak je popsáno v publikaci od Craiga Reynolda, Steering Behaviors For Autonomous Characters [14]. Tudíž nemusí být nutně tři fixní pravidla, ale můžeme k sčítání výsledných vektorů jednotlivých pravidel připsat i pravidla jiná. Kombinacemi těchto pravidel lze dosáhnout různého výsledného chování agentů.

Následující pseudokód ukazuje, jak lze tato pravidla aplikovat.

```
function AllBoidsToNewPosition()
{
   Vector v1, v2, v3
   Boid b

   for (b in allBoids) {
      v1 = Separation(b)
      v2 = Alignment(b)
      v3 = Cohesion(b)
      // v4 = anotherRule(b)

      b.velocity = b.velocity + v1 + v2 + v3
      b.position = b.position + b.velocity
   }

}
```

Výpis 4: Pseudokód pro aplikování třech pravidel

Tento algoritmus se ještě aplikuje do tzv. Flocking algoritmu, který všechny agenty ve scéně vytváří a koordinuje jejich průběh s vizualizací.

3 Implementace

3.1 Popis realizace demonstrační aplikace

Cílem demostrační aplikace je zrealizování a zvizualizování Craig Reynoldova algoritmu do využitelné podoby. Tento algoritmus lze aplikovat mnoha způsoby avšak byly použity dvě spodní varianty:

- Simulace úniku davu lidí z budovy podle nastavených únikových cest.
- Simulace hejna ryb s vyhýbáním se objektu.

Vetšinu parametrů lze měnit/kombinovat v config.cfg souboru *(lze i kombinovat jednotlivá tři pravidla postupným zapínáním/vypínáním)* a měnit mapu včetně únikových bodů lze v souboru map.txt, která je použitelná pouze pro první uvedený typ.

Při vypnutých pravidlech kromě separace se dav bude chovat stylem *"každý si jde kam chce"*.

3.2 Použité technologie

Výsledná aplikace je naprogramována v jazyce C++ a jako hlavní nástroj bylo použito Visual Studio verze 2017 [21], protože je nejpoužívanějším IDE pro vývoj [20].

Jako grafická knihovna byla použita OpenGL [22] s rozšířením pro aplikační okna GLFW *(verze 3.2.1)* [23] a realtime mechanismy GLEW *(verze 2.1.0)* [24].

K načítání objektů posloužila knihovna Assimp [26] *(verze 3.2)*, která je vhodná kvůli velké škále podporovaných grafických formátů.

Pro matematické operace byla použita knihovna GLM [25] *(verze 0.9.8.5)* hlavně pro počítání s maticemi.

Pro zobrazování parametrů a proměnných byla použita GUI AntTweakBar knihovna *(verze 1.16)* [29] kvůli snadnému použití a intuitivnímu rozhraní.

3.3 Problémy při implementaci

První problém nastal kvůli paměťovým nárokům. Důvod byl v obrovském nárustu paměti po zhruba dvou minutách běhu aplikace. Následující tabulka zobrazuje nárust v kB vůči času od posledního načtení objektu, tj. od počátku vizualizace scény.

Tabulka 1: Tabulka nárustu využití paměti RAM

10s	30s	1min	2min	5min
+12kB	+26kB	+51kB	+1240kB	+4281kB

Jak je patrné z hodnot, tak od druhé minuty nárust paměti stoupá takřka exponenciálně. Důvod tak rychlého nárustu byl ten, že jak se postupně k sobě agenti přibližovali, začínalo se aplikovat více pravidel, které ještě neměly optimalizované operace s pamětma. Tzn. nejdříve se začaly aplikovat pravidla s větším průměrem *(buď koheze nebo zarovnání)* kružnice, ale když byli agenti blízko sebe, každému se vyhodnocovala všechna paměťově neoptimalizovaná pravidla. Po pěti minutách byl nárust tak obrovský, že hodnota FPS klesla na 10.

Pro veškeré výpočetní operace s vektory byla vytvořena třída *MyVector* z níž dědí třída *MyVector2D*, která je využita pro pohyb davu v budově. První zmíněná je určená pro hejno. Důvod využití vlastní třídy je přenositelnost a nezávislost algoritmu na platformě. Všechny důležité třídy využívají k vytvoření scény pouze nativní knihovny C++.

Příklad ošetření jedné části kódu:

```
this->tmpVector->set();
this->tmpVectorMem = this->tmpVector;
this->tmpVector = this->tmpVector->subTwoVector(location, Boidss->at(i)->
    location);
// ...operations with tmpVector
this->steer->addVector(this->tmpVector);
delete this->tmpVector;
this->tmpVector = this->tmpVectorMem;
```

Výpis 5: Ukázka eliminace nárustu paměti

Důležitý je třetí řádek, kdy se volá metoda *subTwoVector(...)*, která vrací výsledek odečtení dvou vektoru jako odkaz na nově vytvořenou paměť. Abychom zabránili nárustu paměti, musíme tento výpočet uložit do dočasné paměti *tmpVector* se kterou provedeme patřičné operace a ve chvíli kdy jí už nebudeme potřebovat, tak ji smažeme.

Musíme však zachovat původní adresu *tmpVector*. Pro tento účel slouží proměnná *tmpVectorMem* která slouží jako prostředník pro uchování adresy. Pak tedy můžeme tuto původní adresu přiřadit zpět, v tomto případě poslední řádek kódu.

Pro větší úsporu paměti ve třídě *Boids*, jejíž instance je volána v každé smyčce, tak jednotlivá pravidla i metody pro mezivýpočty používali mezi sebou stejné adresy pamětí.

Aby nedocházelo k neoprávněným přístupům a záměnou adres, tak byla využita pomocná proměnná do které se dočasně uložil výsledek pravidla a pak pomocí metody *set()* z třídy *MyVector* šlo bezpečně nastavil hodnoty vektoru bez jakéhokoliv úniku paměti. Tento způsob byl aplikován na všechna použitá pravidla, včetně vyhýbání se zdem.

Vůči 100 agentům ve scéně měla starší verze aplikace využití RAM 110 MB včetně použitých textur a objektů. Po těchto doposud zmíněných změnách bylo využití 91 MB.

Další vylepšení bylo lepší použití cyklů. Klasický zápis cyklu který byl použit před tímto typem optimalizace je následující:

```
for (int i = 0; i < this->models->size(); i++) {...}
```

Výpis 6: Použití klasického cyklu

Dle oficiálních referencí pro C++ [18] bylo zjištěno, že při každé iteraci cyklem se stále volá metoda *size()*, která tento výkon podstatně snižuje. Řešením je uložit tuto hodnotu do proměnné a tu pak následně porovnávat v podmínce. Dalším vylepšením je použití prefixové inkrementace proměnné *i*. Toto použití je mnohem účinnější než postfixová inkrementace z důvodu, že nepoužívá dočasné úložiště a vkládání potřebného kódu na pozadí [19]. Výsledný cyklus pak vypadá takto:

```
for (int i = 0, len = this->models->size(); i < len; ++i) {...}
```

Výpis 7: Použití optimalizovaného cyklu

Tyto změny důležitých cyklů v hlavní smyčce dokázaly přidat až 5 FPS.

Další problém nastal v načítání objektů. Původní verze nahrávání objektů do scény probíhala v obyčejné smyčce, takže stejné objekty *(v tomto případě objekty agentů)* se načítali vícekrát.

Řešení spočívalo v kopírovacím konstruktoru. Daný typ objektu byl načten pouze jednou a poté se v cyklu předávala adresa načteného objektu kopírovacímu konstruktoru, který tuto paměť nakopíroval pro svou instanci. Při načítání 100 agentů bylo celkově ušetřeno 40 sekund.

```
// loading object method in Flock class
Model *tmpBoidsModel = new Model(this->cfg->OBJ_BOID, this->cfg);
for (int i = 0; i < this->numberOfBoids; ++i) {
   if (tmpBoidsModel != NULL)
      this->boidsModel[i] = new Model(*tmpBoidsModel);
   }
}

// copy constructor in Model class
Model(const Model& model)
:
   textures_loaded(model.textures_loaded),
   meshes(model.meshes),
   directory(model.directory),
   gammaCorrection(model.gammaCorrection),
   cfg(model.cfg)
{}
```

Výpis 8: Ukázka použití kopírovacího konstruktoru

3.4 Steering behaviors

Řízení chování [14] již zmíněné v teoretické části bylo použito pro reálnější podobu chování celého davu.

Jako první vlastnost byla použita metoda seek *(hledání)* primárně používané u Koheze při návratové hodnotě (viz kapitola 2.7), kde bylo upozorněno na složitější implementační část oproti zarovnání.

Hledání je určteno k tomu, aby agent směřoval k nějakému cíli, tak že upravuje aktuální rychlost *(velocity)*. V případě koheze je cíl průměrná lokace okolních agentů. Výsledek této operace je seek vektor.

Následující kód ukazuje jak se seek vektor vypočte.

```
this->tmpVectorMem = desired->subTwoVector(v, this->location);
this->desired->set(this->tmpVectorMem->vec.x, this->tmpVectorMem->vec.y, this->
    tmpVectorMem->vec.z);
delete this->tmpVectorMem;

this->desired->normalize();
this->desired->mulScalar(maxSpeed);

this->seekResult->set();
this->tmpVectorMem = seekResult->subTwoVector(this->desired, this->velocity);
this->seekResult->set(this->tmpVectorMem->vec.x, this->tmpVectorMem->vec.y,
    this->tmpVectorMem->vec.z);
delete this->tmpVectorMem;

seekResult->limit(maxForce);
```

Výpis 9: Vypočtení seek vektoru

Nejprve se spočte lokace na kterou má agent směřovat *(vektor desired)*, a nastavíme maximální zrychlení aby se na místo dostavil co nejdříve.

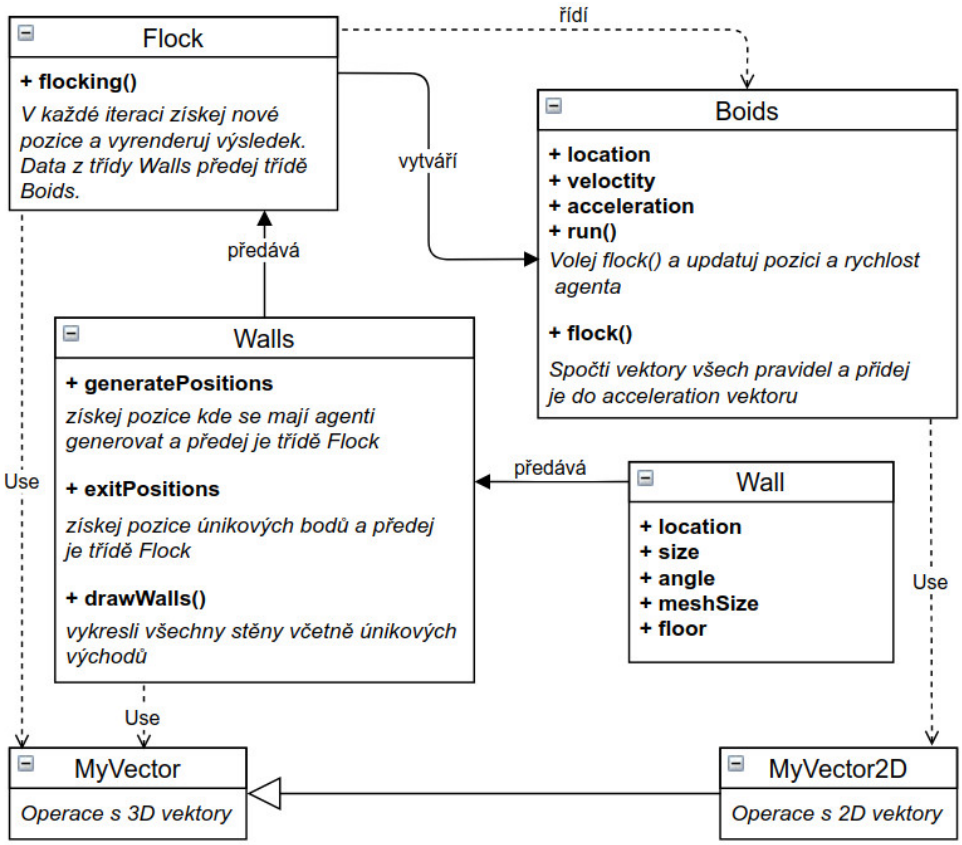
Následuje vypočtení samotného seek vektoru, který je roven rozdílu mezi požadovanou a aktuální rychlostí. V poslední řadě pak musíme vektor limitovat konstantou tření *(maxForce)*.

Další vlastností která byla použita je následování bodů *(Path Following)*. V této práci slouží jako následování kontrolních bodů v budově.

Po určení tohoto jednoho či více bodů na ně agent začně postupně směřovat. Při následování bodů se používá funkce pro vypočtení seek vektoru, který je poté aplikován jako další pravidlo, tzn. k výsledné rychlosti se přičte další vektor (viz kapitola 2.8).

3.5 Třídní diagram

Pro provoz simulace a chování davu slouží tři základní a tři pomocné třídy.



Obrázek 5: Diagram řídicích tříd

Hlavní třídou je třída Flock, která koordinuje komunikaci mezi třídou Walls a Boids. Zároveň se stará o veškeré vytváření agentů, kterým přiřažuje jednotlivé objekty ve scéně, jenž jsou vizualizovány uživateli. Také v každé iteraci volá simulační mechanismy pomocí metody *run()*.

Třída Walls vytváří zdi podle předaných dat z mapy a udržuje informace o generačních pozicích a pozicích únikových bodů. Díky tomu může třída Flock vygenerovat agenty do patřičného patra a pozice. Zároveň jsou tato data sdílena s třídou Boids, která může kontrolovat kolize se zdmi a počítat pozice únikových bodů na které má agent směřovat.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, tak pro operace s vektory byla použita vlastní třída *MyVector* ze které dědí třída *MyVector2D* z důvodu přenositelnosti a nezávislosti algoritmu na platformě.

3.6 Výsledné aplikování pravidel

Všechna pravidla jsou aplikována jako součet výsledků jednotlivých pravidel *(viz kapitola 2.8)*. V této práci k sečtení a vytvoření výsledného vektoru slouží metoda *appplyForce(...))*, která přidá do výsledného vektoru *acceleration* další vektor *(výsledek jednoho z pravidel)*. Tento vektor je pak aplikován v metodě *update()*, která nastaví agentovi novou pozici a rychlost.

```
void Boids::update() {
   acceleration->mulScalar((float)(.4));
   velocity->addVector(acceleration);
   velocity->limit(maxSpeed);
   location->addVector(velocity);
   acceleration->mulScalar(0);
}
```

Výpis 10: Nastavení výsledné pozice agenta

Po vynásobení konstantou 0.4, která slouží pro nastavení citlivosti *(může a nemusí být použita, zde je nastavena po experimentech jako ideální)* následuje přidání, limitování vektoru a vypočtení výsledné pozice. Na konci musíme vektor *acceleration* vynulovat pro použití v další iteraci.

3.7 Únik z budovy

První část využití Reynoldova agoritmu je simulace úniku lidí z budovy podle nastavených únikových cest. Funkčně je tato část určena k tomu, aby po skončení simulace mohl uživatel zjistit, kolik času by zabralo evakuovat lidi z předem definovaného plánu budovy. V případě časově náročné evakuace může uživatel upravit plán budovy a únikové cesty tak, aby budova splňovala dané normy.

Plán budovy můžeme upravovat v souboru *map.txt* včetně definování dalších pater a únikových cest. Jelikož se jedná o textový soubor, tak každý znak reprezentuje jinou funkci. Popis funkčních znaků můžeme vidět níže:

- **G** generační místo pro dav, který lze použít vícekrát v každém patře či místnostech
- **-** reprezentuje vertikální stěnu
- | reprezentuje horizontální stěnu
- + reprezentuje spojovací stěnu jako kombinace horizontální a vertikální stěny
- * blok stěny jednoho bodu, proto ji lze použít jako reprezentaci sloupu v patře
- = reprezentuje začátek schématu nového patra

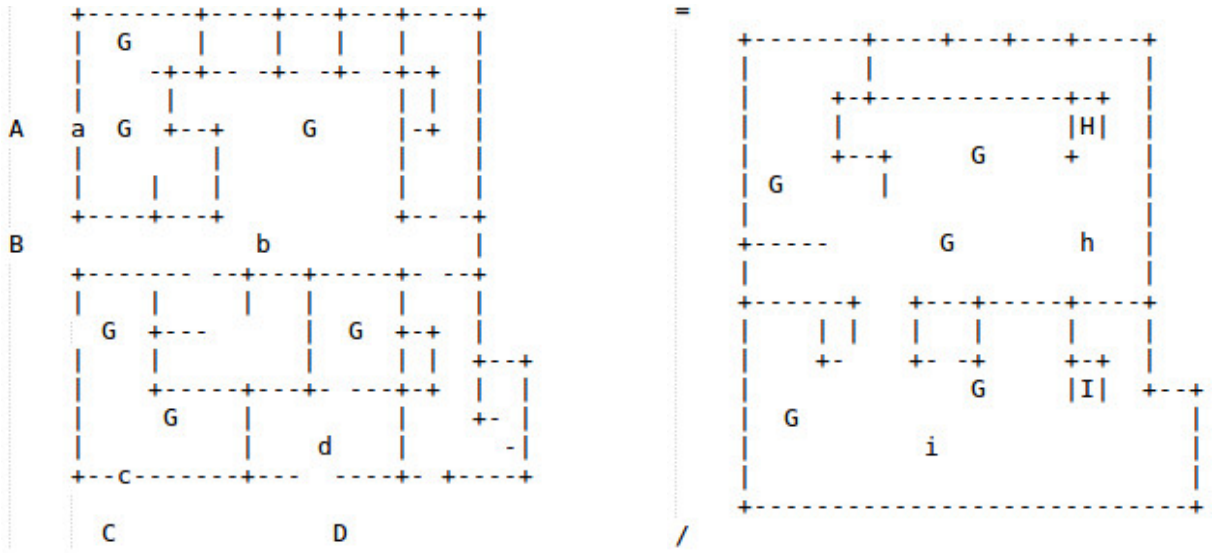
- / ukončovací znak schématu patra
- **A-Z, a-z** únikové body podle který se dav řídí *(mimo G jako generační bod a F jako ukončovací bod zřetězeného řízení davu, viz níže)*
- **1-9, F** zřetězené řízení davu použité jako únik z labyrintu pomocí 10 únikových bodů

Pro únik v jedné části budovy jsou požity dva znaky *(např.: velké písmeno A a malé a)*. Nejdříve dav směřuje k menšímu znaku a poté k většímu, který indikuje finální bod. V každém patře může být těchto únikových bodů libovolný počet, kdy pokud v jednom patře končíme např.: znakem D, pak se v dalším patře začíná od znaku E. Jenotlivý agent určuje ke kterému bodu jít pomocí vzdálenosti od něj *(tj. k nejbližšímu)*.

Druhým typem úniku je únik z labyrintu, tedy složitějších prostor budovy kdy je potřeba více než dva únikové body. Dav začne směřovat k nejbližšímu nejmenšímu číslu a pokud tohoto čísla dosáhne, tak poté začne směřovat k dalšímu o 1 větší dokud neskončí u písmene F. Tento způsob lze aplikovat pouze u vykreslení jednoho patra.

Při spuštění aplikace, která vykreslí definované schéma lze scénu ovládat pomocí následujících kláves:

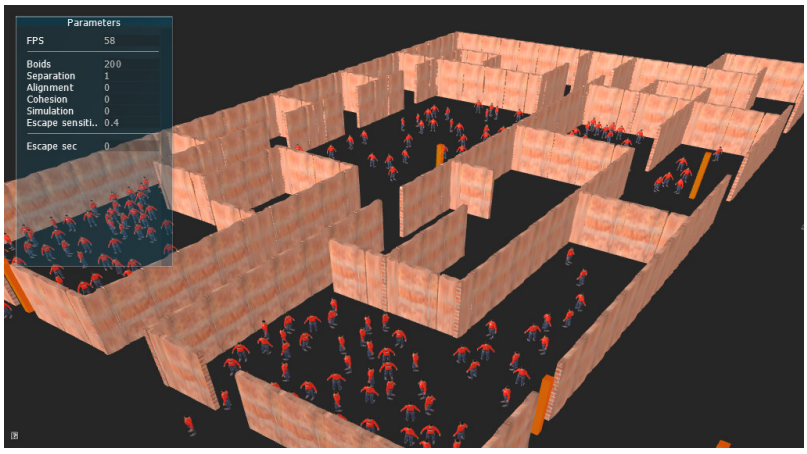
- **1-9** klávesou lze přepínat mezi pohledy jednotlivých pater, přičemž se neaktuální patro přepne do režimu průhlednosti
- **E** přepnutí celé budovy do řežimu průhlednosti se zvýrazněním davů
- **Q** opětovné vykreslení celé budovy bez režimu průhlednosti pater
- **Mezerník** spuštění simulace, opětovným stiskem lze simulaci ukončit



(a) Půdorys (b) Patro

Obrázek 6: Ukázka nákresu budovy v textovém souboru

Při zapnutí simulace jsou agenti v půdorysu okamžitě vedení směrem ven mimo budovu, avšak agenti v dalších patrech musí využít jiné evakuační cesty aby se dostali do spodního patra odkud můžou vyjít ven[4]. Proto pokud se agent v patře dostane k finálnímu bodu úniku *(velké písmeno)*, začne "sestupovat" do přízemí budovy. Sestup však zabere nějaký čas, jednak kvůli zatížení únikových cest tak samotného sestupu. Souvisí s tím také to, že agentovi v posledním patře bude sestup trvat déle než agentovi v prvním patře. Hodnotu míry opuštění budovy *(konkrétněji: evakuační výtah je rychlejší než evakuační schodiště)* lze měnit v konfiguračním souboru pomocí konstanty FLOOR_TIME_DURATION.



Obrázek 7: Ukázka vyrenderovaného půdorysu budovy

[4]Agenty v patře lze také směrovat rovnou ven mimo budovu, tj. forma venkovního evakuačního schodiště. Dole v přízemí mimo budovu však musí být definován další evakuační bod (pod "schodištěm"), jinak začnou agenti směřovat k nejbližšímu bodu, který by jinak byl v budově.

Pro následování bodů byla použita metoda *arriveTo(...)* která využívá metodu *seek(...) (viz kapitola 3.4)*. Abychom správně určili, který agent má kam směřovat, musíme metodě *arriveTo(...)* předat správný vektor, který získáme metodou *getArriveVector(...)*. Ta vrátí výsledný vektor který je předán *seek()* metodě. Výsledek je pak nový vektor, který se aplikuje jako nové pravidlo *(viz kapitola 2.8)* a tím zajistíme že agent bude směřovat na nejbližší únikový bod a následně na finální bod.

```
// getting minIndex from exitPoints...
if ((walls->exitPositions.at(minIndex)->vec.y / walls->floorDiferencial) ==
    this->floor) {

   if (location->distance(walls->exitPositions.at(minIndex)) < cfg->
       PATH_TO_FIND_RADIUS && !this->incrementedOnce) {
      ++minIndex;
      this->incrementedOnce = true;
   }
   // code...
   return walls->exitPositions.at(minIndex);
}
```

Výpis 11: Princip metody getArriveVector(...)

V první části kódu, zde nezmíněné kvůli délce, je získání *minIndex* hodnoty ve které je uložen index z kontejneru *map*, odkud začínají souřadnice únikových bodů ve stejném patře jako je aktuálně kontrolovaný agent. Pokud tedy v půdorysu bude 8 únikových bodů, jak je zobrazeno na obrázku č. 6, tj. 4 finální únikové cesty, pak *minIndex* v následujícím patře bude 9. Je třeba upozornit, že hodnota *minIndex* vždy odkazuje na index menšího písmena.

Následuje podmínka jenž kontroluje, zda-li se agent nachází ve stejém patře jako únikový bod *(souřadnice Y únikového bodu vydělená výškou jednoho patra - konstanta třídy Walls)* a následná kontrola, zda se agent dostal do blízkosti okruhu únikového bodu. Pokud ano, může agent pokračovat k finálnímu bodu tak, že hodnotu *minIndex* zvýšíme o 1.

Mimo další operace které se nachází mezi návratovou hodnotou a předchozími podmínkami, je nakonec vrácen vektor s indexem *minIndex*.

Útěk ze složitějších prostor pomocí čísel *(útěk z labyrintu)* funguje na stejné bázi s tím rozdílem, že se hodnota inkrementuje do té doby dokud agent nenarazí na písmeno F, čili koncový bod.

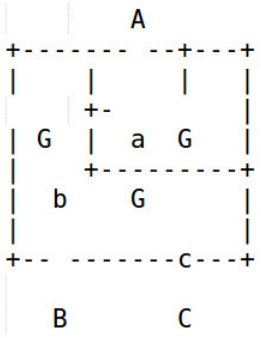
3.7.1 Problémy při úniku z budovy

Agenti se můžou občas dostat do problémů zejména díky špatnému návrhu budovy, nebo také kvůli nedokonalosti Reynoldova algoritmu.

Například pokud při úniku z budovy zapneme všechna tři pravidla, může nastat efekt procházení zdí. Tento problém vzniká kvůli nastaveným konstantám citlivosti u každého pravidla. Tyto konstanty byly nastaveny po řadě experimentů jako nejvhodnější a jsou neměnné *(kromě konstanty citlivosti úniku ESCAPE_SENSITIVITY, kterou lze měnit v konfiguračním souboru)*. Pokud je konstanta příliš nízká, dané pravidlo by zaniklo mezi ostatními. Pokud příliš vysoká, tak by dané pravidlo překrylo ostatní. U konstanty citlivosti úniku je však občas potřebné přenastavení. Částečné řešení spočívá jen v použití separace. Dav se tedy chová jako dav skutečných lidí *(každý si jde kam chce)*.

Další problém může nastat při generování agentů, kdy agenti vyberou jako cestu k nejkratšímu bodu tu variantu, že se bod nachází za zdí či v jiné místnosti (viz obrázek č. 8). S tím souvisí možnost zaseknutí o zeď, kdy má agent před sebou překážku za kterou je cílový bod a např.: dva bloky od něj je východ. Má však nastavenou cestu přímo na bod *(přes zeď)*. Řešení takovýchto situací je však nad rámec této práce *(jedná se o pokročilé techniky AI)*.

S generováním souvisí ještě jedna věc, a sice při generování většího množství agentů na malém prostoru se může některý z nich "zabořit" do zdi a už se z ní nemůže dostat.



Obrázek 8: Problém uváznutí při špatném určení únikových bodů

3.8 Testování úniku z budovy

Testování proběhlo na třech PC s parametry uvedenými v tabulce č. 2. Výsledky testů se na jiných PC mohou lišit.

Tabulka 2: Tabulka parametrů PC na kterých proběhlo testování

	PC1	PC2	PC3
CPU	Intel i7-2637M @ 2.7GHz	Intel i5-2500 @ 3.3GHz	Intel i7-5820 @ 3.3GHz
RAM	4 GB	12 GB	16 GB
GPU	Intel HD Graphics 3000	Radeon R9 280X Dual-X	GeForce 1070 Ti

Všechny části testů byly provedeny na schématu budovy s parcelou 30x17 bloků, kdy jeden blok odpovídá jednomu znaku v textovém souboru *map.txt* a na 1x1 blok se vejde průměrně 5 agentů bez větších kolizí. Kompletní plán budovy se nachází v souboru *mapCompleted.txt*.

Tabulky zobrazují jaké byly hodnoty FPS při daném počtu agentů, počtu pater a složitosti budovy *(počet zdí)*. Hodnoty FPS jsou odečteny před a během simulace. Poslední hodnotou je čas opuštění budovy.

Testy proběhly při počtu agentů 200, počtu pater 5, rychlostí agentů 3 s maximální hodnotou tření 0.1 a nastavení míry opuštění jednoho patra na 8 sekund.

Tabulka 3: Tabulka naměřených hodnot - PC1

Pater	Únikových bodů	Počet zdí	FPS před	FPS během	Čas [s]
0	8	193	51	50	65.3
1	10	343	48	46	151.6
2	14	513	43	40	202.1
3	18	683	39	37	213.7
4	22	853	36	31	245.2
5	24	1023	32	28	337.1

Tabulka 4: Tabulka naměřených hodnot - PC2

Pater	Únikových bodů	Počet zdí	FPS před	FPS během	Čas [s]
0	8	193	56	55	61.6
1	10	343	57	55	121.7
2	14	513	52	45	153.1
3	18	683	46	38	162.4
4	22	853	41	39	173.3
5	24	1023	40	36	246.5

Tabulka 5: Tabulka naměřených hodnot - PC3

Pater	Únikových bodů	Počet zdí	FPS před	FPS během	Čas [s]
0	8	193	120	118	58.2
1	10	343	111	105	94.1
2	14	513	102	92	97.3
3	18	683	90	84	112.4
4	22	853	82	71	116.1
5	24	1023	74	64	169.8

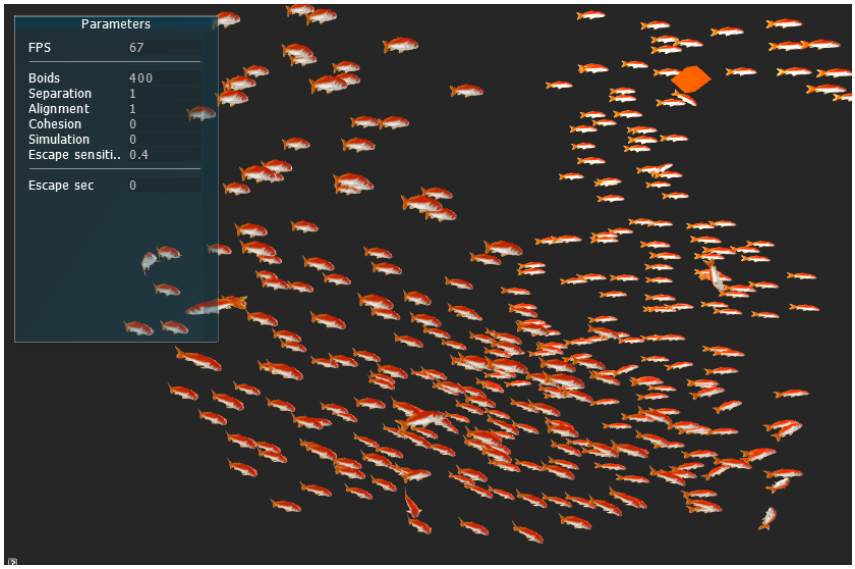
Jak je patrné, tak čím více je pater, tím více klesá FPS z důvodu více kontrol kolizí se zdmi *(i když se řeší kolize v každém patře zvlášť)*.

3.9 Simulace hejna ryb

Druhý typ využití Reynoldova algoritmu je simulace hejna. V tomto případě je použita simulace ryb, ale při změně načítaného objektu v konfiguračním souboru můžeme vytvořit simulaci čehokoliv. Pro změnu scény je třeba přepsat několik parametrů, zejména pak SCENE_TYPE na 3D. U výsledné aplikace je připraven obsah souboru *configFish.cfg* pro simulaci ryb, kterým stačí přepsat obsah hlavního souboru *config.cfg* bez potřeby přepisování všech důležitých parametrů.

Algoritmus funguje stejně jako při úniku z budovy, výjma využití třídy *MyVector2D*, která je nahrazena výpočty ve 3D třídou předka *MyVector*.

V konfiguračním souboru můžeme nastavit počet objektů, kterým se agenti budou vyhýbat. V případě, že se agent dostane do blízkosti objektu, pak vyhýbání funguje obdobně jako separace, akorát normalizování vektoru a vydělení vektoru počtem okolních agentů je nahrazeno vynásobení skalárem.



Obrázek 9: Ukázka hejna ryb

U této simulace jsou hodnoty FPS přijatelné i pro slabší PC, tj. pro již zmíněné hodnoty v tabulce č. 2 byly hodnoty pro PC1 a PC2 cca 65 FPS a to při počtu agentů 400.

3.9.1 Problémy při simulaci hejna

U této simulace nastávají problémy "cukání" pokud agent začne vyhodnocovat, že se přiblížil k okraji mapy. Důvod tohoto efektu je aplikování kolize s ostatními agenty a zároveň kolize s okrajem mapy. Tento problém nebyl vyřešen ani při zkoušení různých nastavení citlivostí jednotlivých pravidel.

Neplatí to však pro menší množství agentů *(např.: 20 agentů na větší ploše)*. Tyto vizuální problémy nastávají při množství několika set agentů.

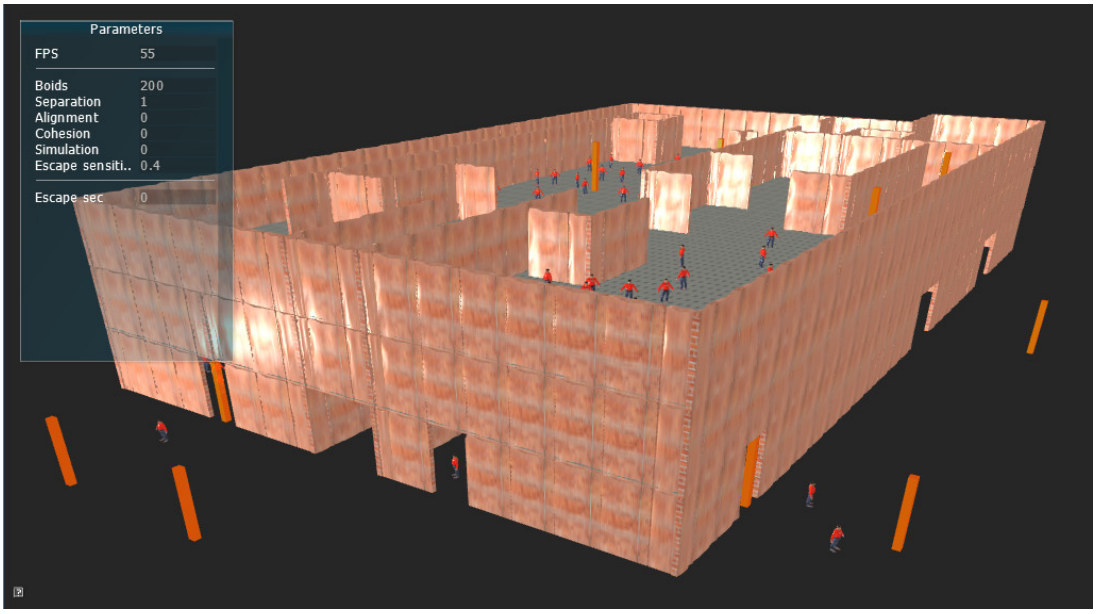
4 Zhodnocení

Z výsledků tabulek č. 3, 4 a 5 je znatelné, že pokud je PC výkonější pak čas úniku je kratší. Toto však lze zobecnit stejnými časy díky nastavení rychlosti agentů. U PC2 byla rychlost agentů vizuálně nejblíže, kdežto u PC3 agenti "utíkali" z budovy nepřirozeně rychle a u PC1 šli krokovým tempem. Lze tedy říci, že realitě nejvíce odpovídají hodnoty z tabulky pro PC2.

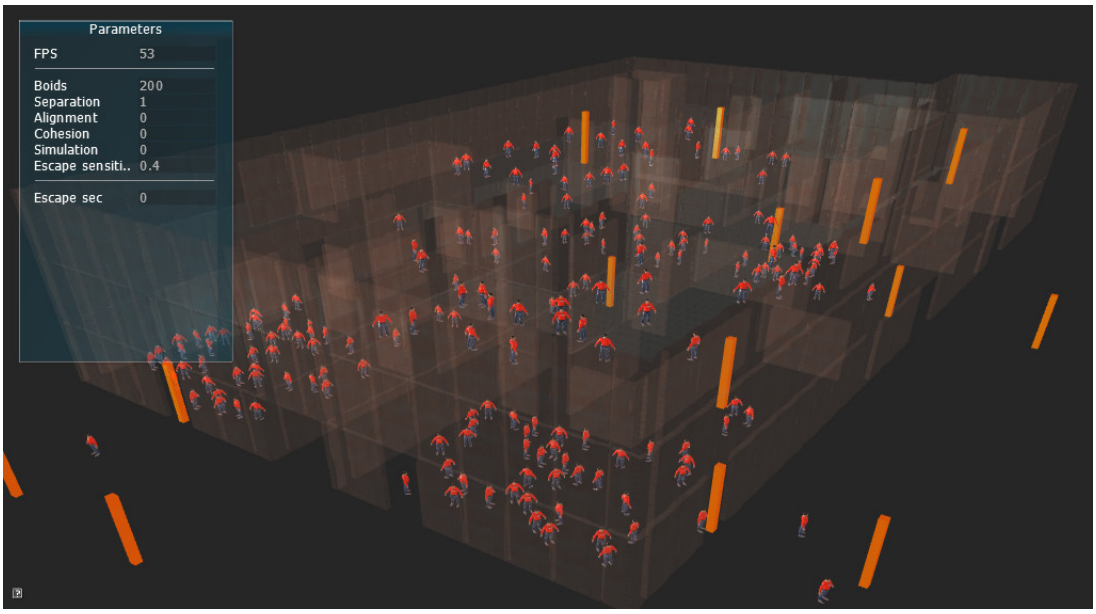
I když byly použity vylepšené techniky Reynoldova algoritmu *(seek, path following)* a vyladěná všechna tři pravidla, tak stále tento algoritmus není dokonalý (kapitoly 3.7.1, 3.9.1) a pro naprosto reálnou podobu davu se musí ještě hodně vlastností a pravidel připsat.

Do budoucna by bylo vhodné tato pravidla dodělat a tím zajistit, aby agenti v budově byli inteligentnější a nešli přímou cestou za únikovým bodem, případně aby se rozhodovali o úniku dle sektorů budovy.

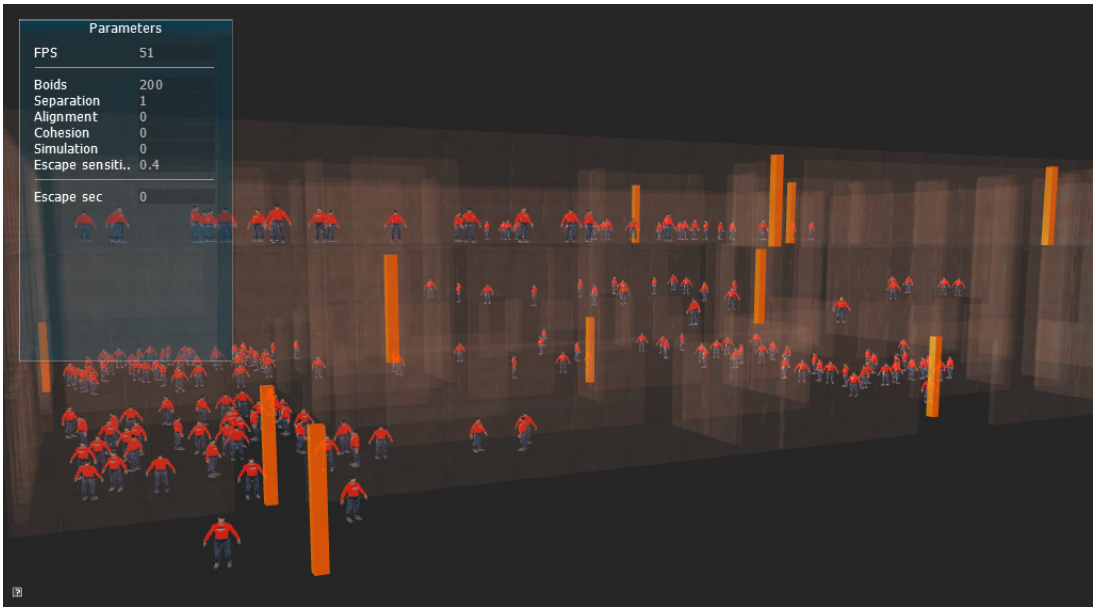
I přes tyto nedostatky lze Reynoldův algoritmus efektivně aplikovat jako simulaci hejna (viditelné na obrázku č. 13), což je také nejvyužitelnější způsob. I tak je díky své nedokonalosti a zároveň jednoduchosti nejpoužívanějším algoritmem pro simulaci davu na bázi AI.



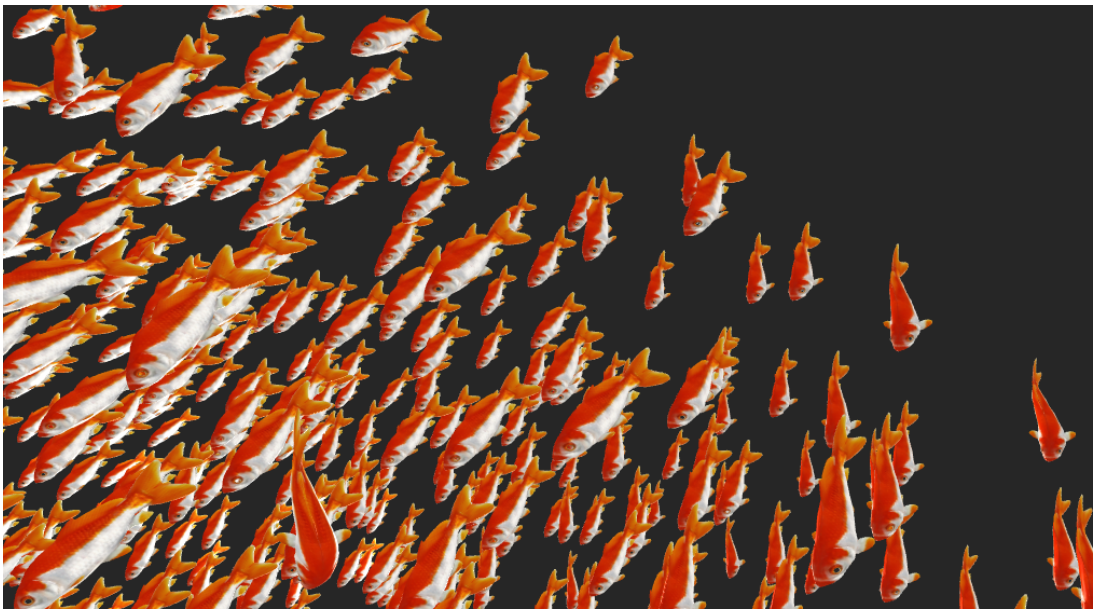
Obrázek 10: Vyrenderovaná třípatrová budova



Obrázek 11: Budova přepnuta do průhledného režimu se zviditelněním agentů a únikových bodů



Obrázek 12: Průhledný režim budovy z boční perspektivy



Obrázek 13: Vyrenderované hejno ryb

5 Závěr

Výsledkem této práce je aplikace, která má za úkol zrealizovat simulační algoritmus davu. Teoreticky byly popsány dvě varianty simulace, z níž pro realizaci byla vybrána simulace na bázi AI a pro realizaci byl vybrán Craig Reynoldův algoritmus. V první možnosti využití, a sice evakuace budovy, se Reynoldův algoritmus a jeho vylepšení neosvědčil na plno, avšak pro simulaci hejna byl vyhodnocen jako plně dostačující.

Aplikace nabízí dvě možnosti využití. První, jak již bylo zmíněno, je simulace úniku lidí z bodovy a druhá je využití obecného Boidova algoritmu jakožto simulace hejna (v této práci hejno ryb). U první je možnost nadefinovat si vlastní schéma budovy včetně únikových východů a u druhé je možnost nadefinovat počet objektů, jimiž se bude hejno vyhýbat. Uživatel si tak může vyzkoušet na obou příkladech výhody a nevýhody Reynoldova algoritmu a také vliv jednotlivých parametrů na výslednou scénu.

Reference

[1] Journal of the royal society interface, *Crowd behaviour during high-stress evacuations in an immersive virtual environment*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/13/122/20160414`

[2] Boids, *Background and Update by Craig Reynolds*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `https://www.red3d.com/cwr/boids/`

[3] Unreal Engine 4 *simulace ryb*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://blog.csdn.net/nosix/article/details/52859160`

[4] The nature of code, *Chapter 6. Autonomous Agents*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://natureofcode.com/book/chapter-6-autonomous-agents/`

[5] Boids Pseudocode, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://www.kfish.org/boids/pseudocode.html`

[6] Simulace, *Glosář Aldebaran*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1299`

[7] Oasys, *Crowd Simulation*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://www.oasys-software.com/products/engineering/massmotion.html`

[8] Earthlight, *Spacewalk*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://www.earthlightvr.com/spacewalk/`

[9] FAAC Military, , [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `https://www.faac.com/military/`

[10] Techopedia, *Iteration*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `https://www.techopedia.com/definition/3821/iteration`

[11] ACM, *Association for Computing Machinery*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `https://www.acm.org/about-acm/what-is-acm`

[12] SIGGRAPH, , [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `https://www.siggraph.org/about/what-is-acm-siggraph`

[13] Simulace davu, Mgr. Jan Stria,
Matematicko-fyzikální fakulta (MFF), [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/60388/`

[14] Steering Behaviors For Autonomous Characters
Craig W. Reynolds, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: `http://www.red3d.com/cwr/steer/gdc99/`

[15] Kohezní síla, *Glosář Aldebaran*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1894

[16] Katedra Mechaniky, *Skalár*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-1]
Dostupné z: https://www.kme.zcu.cz/kmet/bio/matskalvekt.php

[17] Techopedia, *IDE*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z:
https://www.techopedia.com/definition/26860/integrated-development-environment-ide

[18] CppReference.com, , [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: http://en.cppreference.com/w/

[19] CppReference.com, *Increment/decrement operators*, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: http://en.cppreference.com/w/cpp/language/operator_incdec

[20] Top IDE Index, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: https://pypl.github.io/IDE.html

[21] Visual Studio IDE, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: https://www.visualstudio.com

[22] OpenGL, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: https://www.opengl.org/

[23] GLFW, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: http://www.glfw.org/

[24] GLEW, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: http://glew.sourceforge.net//

[25] GLM, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: https://glm.g-truc.net/0.9.8/index.html

[26] Assimp, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: http://assimp.sourceforge.net/

[27] Stb image, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: https://github.com/nothings/stb

[28] OpenCV, [online]. 2018 [cit. 2018-2-4]
Dostupné z: https://opencv.org/

[29] AntTweakBar, [online]. 2018 [cit. 2018-2-13]
Dostupné z: http://anttweakbar.sourceforge.net/doc/

A Přílohy

Součástí přiloženého CD je:

- Elektronická verze této práce ve formátu PDF.
- Zdrojové kódy demonstrační aplikace.
- Spustitelný soubor demonstrační aplikace.