

# Symulacja ruchu ludzi w centrum handlowym

Paweł Kłeczek

*pkleczek@student.agh.edu.pl*

Kajetan Rzepecki

*kajetan.rzepecki+agh@gmail.com*

20 grudnia 2012

## Streszczenie

Praca i związany z nią projekt dotyczą symulowania ruchu ludzi w centrum handlowym z wykorzystaniem modelu *Social Distances* na dwuwymiarowej siatce.

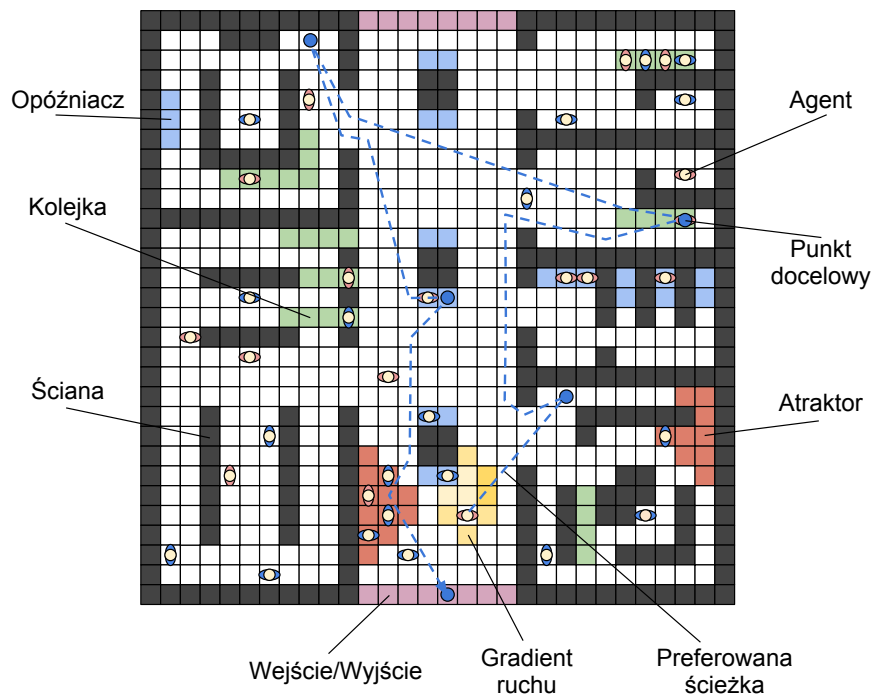
# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>2</b>
1.1	State of the art . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Model centrum handlowego</b>	<b>5</b>
2.1	Atraktory . . . . .	5
2.2	Kolejki . . . . .	6
2.3	Przejścia/wejścia/wyjścia . . . . .	6
2.4	Miejsca oczekiwania (Opóźniacze) . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Model ruchu ludzi</b>	<b>7</b>
3.1	Faza taktyczna . . . . .	8
3.2	Faza operacyjna . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Implementacja</b>	<b>11</b>
4.1	Reprezentacja centrum handlowego . . . . .	11
4.2	Wybór punktów docelowych . . . . .	12
4.3	Znajdowanie ścieżek . . . . .	13
4.4	Dewiacja ścieżek . . . . .	13
4.5	Reprezentacja agentów . . . . .	14
4.6	Ruch agentów i Ped-4 . . . . .	15
4.7	Social Force . . . . .	17
4.8	Wizualizacja i pozyskiwanie danych . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Symulacja i analiza wyników</b>	<b>20</b>
5.1	Kalibracja i walidacja parametrów symulacji . . . . .	20
5.2	Uzyskane wyniki ilościowe i jakościowe . . . . .	21
5.3	Wyniki symulacji a rzeczywistość . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Literatura</b>	<b>26</b>

# 1 Wprowadzenie

Celem wykonywanego projektu jest stworzenie modelu oraz symulacja ruchu ludzi w centrum handlowym w oparciu między innymi o model *Social Distances* ([Wąs, Gudowski, Matuszyk 2006, Karakayali 2009]).

Modelowanie ruchu dużych grup ludzi w środowisku centrum handlowego jest problemem złożonym i wymaga wykorzystania równie złożonych algorytmów celem dokładnego przybliżenia rzeczywistych zachowań. Dobrym podejściem jest dekompozycja problemu modelowania złożonego zjawiska na mniejsze, łatwiejsze do rozwiązania podproblemy, którymi zajmują się osobne, dobrze zdefiniowane i wyspecjalizowane algorytmy, i ponowne połączenie wyników ich działania w spójną całość - metoda *Divide and Conquer*.



Rysunek 1: Przykładowa dekompozycja problemu modelowania ruchu ludzi w centrum handlowym.

W zależności od domeny rozwiązywanego problemu dekompozycja może zachodzić ze względu na wiele czynników i dotyczyć różnych aspektów problemu - np. podział wejściowego zbioru danych na dwa mniejsze podzbiory w algorytmie *Quick sort*, czy podział modelu ruchu ludzi na elementarne zachowania, jak *kolejkowanie*, *atrakcja* lub *oczekiwanie*.

Na rysunku 1 została przedstawiona przykładowa dekompozycja problemu poruszającego się po centrum handlowym agenta do obranych przez niego celów i lokalny ruch zgodny z gradientem ruchu obliczonym na podstawie jego otoczenia. Dodatkowo zastosowano podział na specjalne strefy odpowiedzialne za modelowanie elementarnych zachowań ludzi w centrach handlowych, takie jak strefy kolejek, czekania i gromadzenia się, które realizowane są za pomocą innych modeli ruchu.

## 1.1 State of the art

Zagadnienia modelowania ruchu ludzi są od długiego czasu postrzegane jako istotne z punktu widzenia usługowego. Już w latach 80 ubiegłego wieku Aloys Borgers i Harry Timmermans zajmowali się modelowaniem ruchu pieszych w środowisku centrum handlowego w oparciu o modele probabilistyczne ([Borgers, Timmermans 1986]). Na przestrzeni lat modele ruchu pieszych ewoluowały w wielu kierunkach, od dynamiki płnów ([Helbing 1992]) przez automaty komórkowe ([Blue, Adler 2001]) i algorytmy genetyczne ([Kitazawa, Batty 2004]) aż do modeli opartych o systemy wieloagentowe ([Rauh, Schenk, Schrödl 2011]).

*Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways* ([Blue, Adler 2001]) skupia się na modelowaniu dwukierunkowego ruchu ludzi z wykorzystaniem automatów komórkowych. Praca ta dowodzi, że stosunkowo nieskomplikowany automat komórkowy z małą liczbą reguł jest zdolny do symulowania skomplikowanych zachowań, które dobrze oddają rzeczywistość. Zaproponowany model i algorytm **CA-ped** pozwalają symulować ruch ludzi w dwóch przeciwnych kierunkach na dwóch oddzielnych jak i mieszanych pasach ruchu, a także dynamicznych, wieloliniowych (*dynamic multi-lane*, *DML*) pasach ruchu.

Algorytm **CA-ped** wyróżnia dwie fazy ruchu, z których każda charakteryzuje się trzema prostymi zasadami:

### 1. Zmiana pasa ruchu

- Eliminacja konfliktów - dwóch przechodniów nie może znajdować się na jednej komórce, w przypadku konfliktu wolna komórka oddzielająca dwóch przechodniów jest przyznawana jednemu z nich z równym prawdopodobieństwem.
- Identyfikacja wolnych przestrzeni - wybierany jest ten pas ruchu, który cechuje największa liczba wolnych komórek, co implikuje bezproblemowy ruch w przyszłości.
- Zmiana pasa - każdy przechodzień jest poruszany na jeden z dwóch sąsiednich pasów, lub pozostaje na obecnym pasie ruchu.

### 2. Ruch do przodu

- Obliczanie szybkości ruchu - dla każdego przechodnia obliczana jest jego szybkość uzależniona od istnienia, bądź nie, wolnych komórek w jego otoczeniu.
- Wymijanie - jeśli bezpośrednio przed przechodniem w niedużej odległości istnieje przeciwny przechodzień, to z zadaniem prawdopodobieństwem następuje wyminięcie obu przechodniów.
- Ruch - każdy przechodzień jest przemieszczany do przodu zgodnie z szybkością jego ruchu.

*Pedestrian behaviour modelling - An application to Retail Movements using a Genetic Algorithm* ([Kitazawa, Batty 2004]) identyfikuje problemy i nieścisłości wynikające ze stosowania modeli opartych o najkrótsze ścieżki (*shortest-paths*) i maksymalizację przydatności (*utility-maximization*) do symulowania ruchu ludzi w centrum handlowym. Specjalnie zaprojektowany algorytm genetyczny wykorzystuje informacje o optymalnych ścieżkach i mapę routingu i atrybutów konkretnych miejsc centrum handlowego do znalezienia mniej optymalnych ścieżek prowadzących agentów do wybranych przez nich sklepów, które lepiej modelują zachowanie ludzi w środowisku centrum handlowego.

Na podstawie społecznych i ekonomicznych atrybutów poszczególnych miejsc centrum handlowego i atrybutów ludzi przebywających w centrum handlowym, takich jak szybkość, wiek,

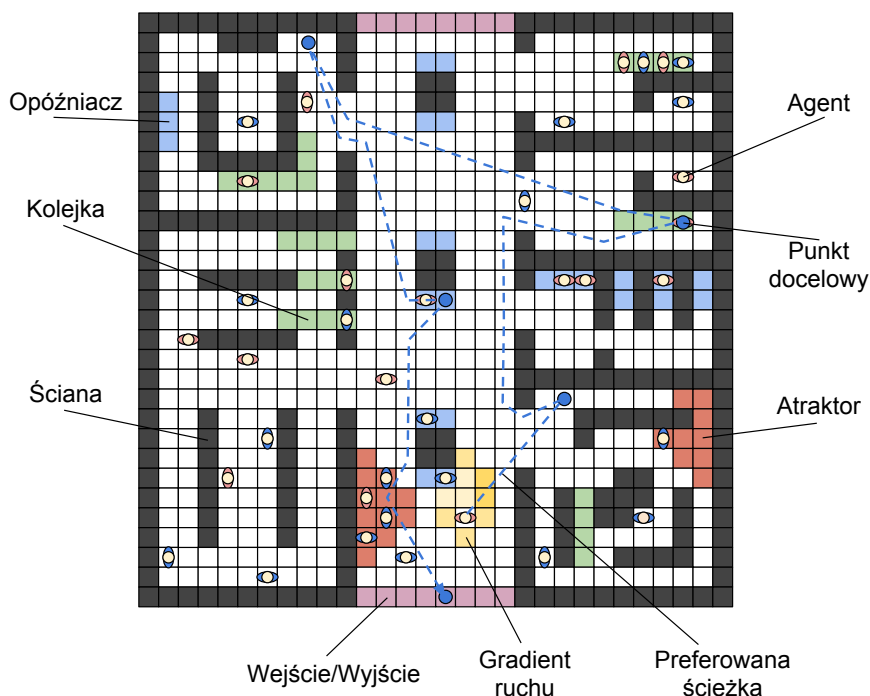
płec i przychód, oraz korzystając z mapy routing algorytm wyznacza listę miejsc zainteresowania, które kupujący planują odwiedzić. Następnie z użyciem algorytmu genetycznego wyznaczane są ścieżki obejmujące wszystkie miejsca zainteresowania konkretnego kupującego, które zostają wykorzystane w dalszej części symulacji. Istotnym jest wyszczególnienie fazy ruchu lokalnego, gdzie zachodzą dodatkowe zjawiska, których nie obejmuje zasięg zastosowanego algorytmu genetycznego. Wspomniane zjawiska to *omijanie przeszkód* (*collision avoidance*) występujących w lokalnym otoczeniu poruszającego się człowieka oraz *grupowanie się* (*flocking*), czyli skomplikowane zjawisko przyciągania kupującego do grup innych kupujących zgodnie z jego socjologicznymi preferencjami.

*The Simulated Consumer - an Agent-based approach to Shopping Behaviour* ([Rauh, Schenk, Schrödl 2011]) identyfikuje istnienie dużej liczby różnych schematów zachowań i szeroki zakres problemu modelowania ruchu ludzi w centrum handlowym proponując podejście agentowe jako dostatecznie elastyczną metodę modelowania skomplikowanej dynamiki kupujących. W oparciu o skorelowane w niewielkim stopniu dane pochodzące z północy Szwecji i południa Niemiec autorzy definiują agentowy model wyboru miejsc zainteresowania, który następnie z powodzeniem stosują do symulowania zachowania kupujących w dwóch różnych sektorach - spożywczym i odzieżowym, jednocześnie potwierdzają elastyczność zaproponowanego modelu.

Więcej interesujących publikacji związanych z tematyką tego projektu zawarto w sekcji 6.

## 2 Model centrum handlowego

Zgodnie z metodą *Divide and Conquer* zaproponowaną we wprowadzeniu, zdecydowano się na dekompozycję problemu modelowania ruchu ludzi w centrum handlowym na elementarne, abstrakcyjne zachowania oraz, ze względu na cele poszczególnych agentów i sposoby ich osiągania, na globalne i lokalne planowanie trasy podróży, co zawarto na rysunku 2.

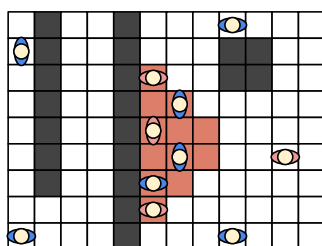


Rysunek 2: Zastosowana dekompozycja problemu.

Model centrum handlowego przewiduje istnienie specjalnych stref, wewnątrz których algorytmy odpowiedzialne za poruszanie agentów są modyfikowane lub zastępowane celem modelowania dobrze zdefiniowanych elementarnych zachowań, takich jak *kolejkowanie*, czy *grupowanie się*. W wyniku obserwacji stwierdzono istnienie czterech rodzajów stref specjalnych - strefy przyciągania uwagi (atraktory), kolejki, przejścia i miejsca oczekiwania (opóźniacze).

### 2.1 Atraktory

Atraktor jest specjalną strefą przyciągającą uwagę agentów poruszających się po centrum handlowym. Atraktor ma za zadanie modelować obecność przedmiotu lub zjawiska, które przyciąga uwagę ludzi na terenie centrum handlowego, a wynikiem jego działania jest spontaniczne powstawanie skupisk ludzi - *grupowanie się*.

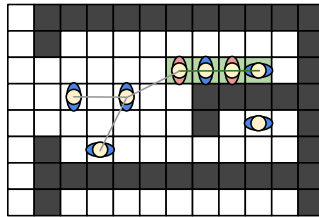


Rysunek 3: Grupowanie się agentów w obrębie atraktora.

Atraktory różnią się między sobą typami - atraktory różnych typów przyciągają inne rodzaje agentów, co modeluje różnice w preferencjach ludzi przebywających w centrum handlowym.

## 2.2 Kolejki

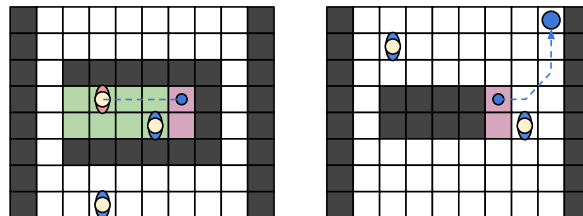
Drugim istotnym z punktu widzenia modelu centrum handlowego typem strefy specjalnej jest strefa kolejki. Zadaniem kolejki jest modelowanie zjawiska *ściśłego kolejkowania się* ludzi, na przykład przy kasie sklepowej, lub na stopniach eskalatora, co nie wynika z ogólnego modelu ruchu.



Rysunek 4: Kolejowanie się ludzi przy kasie sklepowej z zaznaczoną kolejką ścisłą.

## 2.3 Przejścia/wejścia/wyjścia

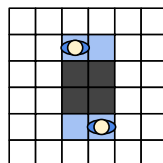
Strefy przejść podobnie jak koleki modyfikują preferencje odległościowe agentów i prowadzą do zmniejszenia odległości między nimi, co nie wynika z ogólnego modelu ruchu. Przejścia, jak sama nazwa wskazuje, modelują wszelkiego rodzaju wejścia, wyjścia i przejścia prowadzące między piętrami centrum handlowego.



Rysunek 5: Poruszanie się agenta po eskalatorze pomiędzy piętrami centrum handlowego.

## 2.4 Miejsca oczekiwania (Opóźniacze)

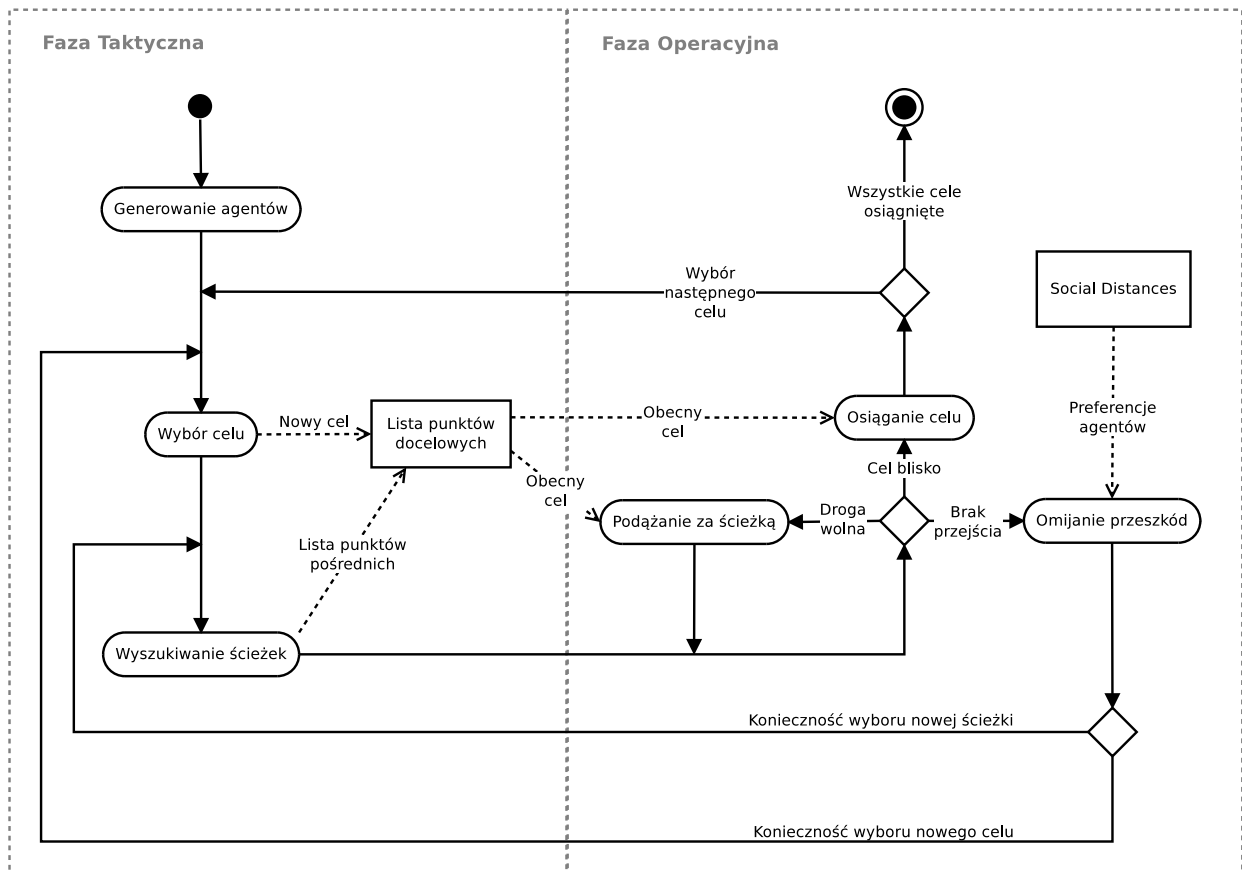
Ostatnim istotnym typem strefy specjalnej jest miejsce oczekiwania, modelujące wszelkiego rodzaju miejsca spędzania czasu w bezruchu.



Rysunek 6: Agenci oczekujący końca świata.

### 3 Model ruchu ludzi

W zastosowanym algorytmie można wyszczególnić dwie główne, wzajemnie od siebie zależne fazy - fazę taktyczną oraz fazę operacyjną, których interakcję przedstawiono na poniższym, uproszczonym diagramie.



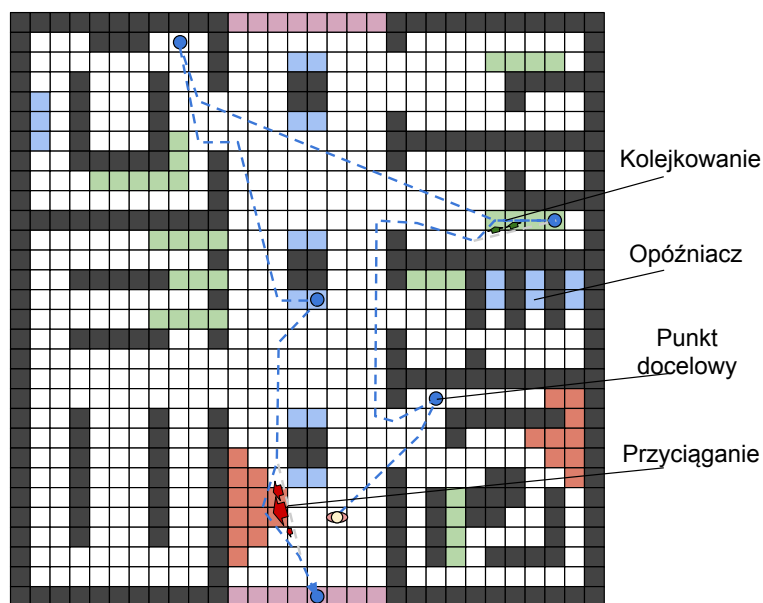
Rysunek 7: Diagram aktywności agentów.

Algorytm rozpoczyna działanie od wygenerowania agenta na podstawie wcześniej zdefiniowanych archetypów. Dla każdego agenta wybierana jest wstępna lista miejsc docelowych, które zostaną przez niego odwiedzone w czasie działania symulacji, oraz obliczana jest optymalna ścieżka łącząca wybrane w poprzednim kroku miejsca docelowe. Algorytm następnie modyfikuje ścieżkę w oparciu o mapę rozkładu stref specjalnych centrum handlowego by lepiej modelować faktyczne zamiary danego agenta. Faza taktyczna kończy się wybraniem niewielkiej ilości punktów pośrednich leżących na wyznaczonej ścieżce.

Po wygenerowaniu niezbędnych danych taktycznych dla każdego agenta algorytm przechodzi do fazy operacyjnej, która odpowiada za właściwe przemieszczanie agentów. Faza ta zachodzi w lokalnym otoczeniu każdego agenta i odpowiada za zachowania takie jak omijanie przeszkód, grupowanie się i podążanie za obraną ścieżką. Algorytm na podstawie bezpośredniego otoczenia agenta oraz metadanych dotyczących obecnego celu jego podróży podejmuje decyzje o możliwości wykonania ruchu, lub w przypadku skrajnym o modyfikacji wybranej ścieżki prowadzącej do celu, czy nawet zmianie aktualnego celu podróży. W przypadku osiągnięcia miejsca docelowego algorytm przechodzi do rozpatrywania następnego miejsca docelowego, lub w tryb "błądzenia", gdy osiągnięto już wszystkie wyznaczone cele.



### 3.1 Faza taktyczna



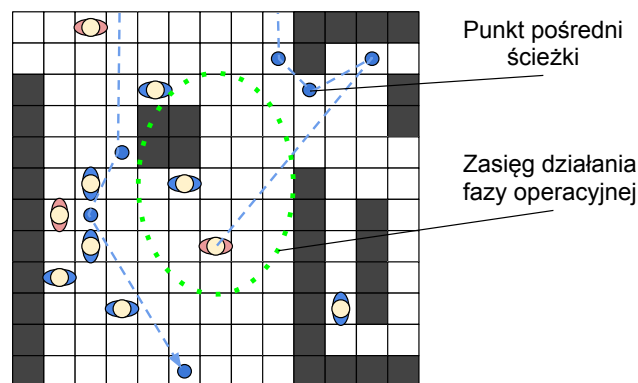
Rysunek 8: Zakres operacji taktycznej części modelu ruchu.

Faza taktyczna zachodzi globalnie dla każdego agenta bez uwzględnienia jego lokalnego otoczenia, innych agentów, czy fizycznych właściwości centrum handlowego - nie jest istotnym, czy dany korytarz został zablokowany przez grupę ludzi i nie umożliwia przejścia. Faza ta modeluje abstrakcyjne zamiary agenta i jej celem jest przede wszystkim wybór listy miejsc docelowych oraz wyznaczenie dróg do nich prowadzących.

Osiągnięto to dzięki algorytmowi znajdowania ścieżek  $A^*$  oraz mapie rozkładu stref specjalnych centrum handlowego, która jest wykorzystywana jako dodatkowa heurystyka  $A^*$  - specjalne strefy centrum handlowego modyfikują estymowaną ocenę danego punktu wyznaczanej ścieżki nadając jej pożądany kształt i prowadząc ją w odpowiedni sposób do celu podróży.

Przy wyznaczaniu ścieżek pod uwagę brane są atraktory, kolejki i przejścia, które algorytm stara się uwzględnić za pomocą opisanej heurystyki.

### 3.2 Faza operacyjna



Rysunek 9: Zakres działania operacyjnej części modelu ruchu.

Faza operacyjna zachodzi w lokalnym otoczeniu każdego agenta, a jej celem jest wykonanie właściwego ruchu agenta. Faza ta jest odpowiedzialna za unikanie kolizji i omijanie przeszkód. Pod uwagę brani są inni agenci oraz metadane dotyczące drogi prowadzącej do aktualnego celu podróży wygenerowane w taktycznej fazie działania algorytmu. W implementacji fazy operacyjnej wykorzystano zmodyfikowane algorytmy Ped-4 i Social-Force.

Oryginalny **Ped-4** został zaproponowany w pracy *Modeling Four Directional Pedestrian Movements* ([Blue, Adler 2000]). Ponieważ prowadzi on do samoorganizowania się pieszych w kolumny, w symulacji galerii używany jest w odniesieniu do przestrzeni, po których ruch odbywa się w sposób uporządkowany (tj. do korytarzy, alejek oraz niewielkich skrzyżowań).

Algorytm składa się z następujących etapów:

1. **Dostosowanie kierunku ruchu** - gdy kąt między kierunkiem ruchu, a kierunkiem do celu przekroczy wartość graniczną, pieszy skręca w stronę celu.
2. **Zmiana pasa ruchu** - obliczana jest ilość wolnych pól dla obecnie zajmowanego pasa i dla pasów sąsiednich. Pieszy zajmuje ten pas, który na chwilę obecną umożliwia mu przesunięcie się o największą ilość pól do przodu. Przy wyborze preferowany jest dotychczasowy pas. W przypadku, gdy obecnie zajmowany pas nie jest "czysty" (tzn. z naprzeciwka idzie inny pieszy), aby uniknąć kolizji pieszy stara się "schować" za inną osobą idącą w tym samym co on kierunku.
3. **Krok naprzód** - w przypadku, gdy pole bezpośrednio przed pieszym (zgodnie z kierunkiem ruchu) jest wolne - próba zajęcia go. Jeśli nie jest to możliwe - próba dokonania zamiany miejsca z innym pieszym. Wymiana odzwierciedla sytuację, gdy piesi "skręcają tułowiem", by "przecisnąć się" obok siebie. Etap *krok naprzód* powtarzany jest wielokrotnie, dopóki nie skończą się "punkty ruchu" pieszego.

Poniżej zamieszczono preferowaną kolejność dokonywania zamian:

1. między pieszymi idącymi w przeciwnych kierunkach na tym samym pasie
2. między pieszymi idącymi w przeciwnych kierunkach na sąsiednich pasach (na polach po przekątnej)
3. między pieszymi idącymi w kierunkach prostopadłych względem siebie (na polach po przekątnej)
4. między pieszymi idącymi w kierunkach prostopadłych względem siebie (jeden “tarasuje” drugiemu drogę)

Pieszy może wybrać daną możliwość tylko wtedy, gdy jego “partner” do zamiany nie wykonał jeszcze swojego ruchu. Jeśli dana wymiana nie dojdzie do skutku, próbowana jest kolejna opcja z listy (znajduje to potwierdzenie w obserwacjach - w sytuacji dużego tłoku ludzie chętniej dokonują takich manewrów).

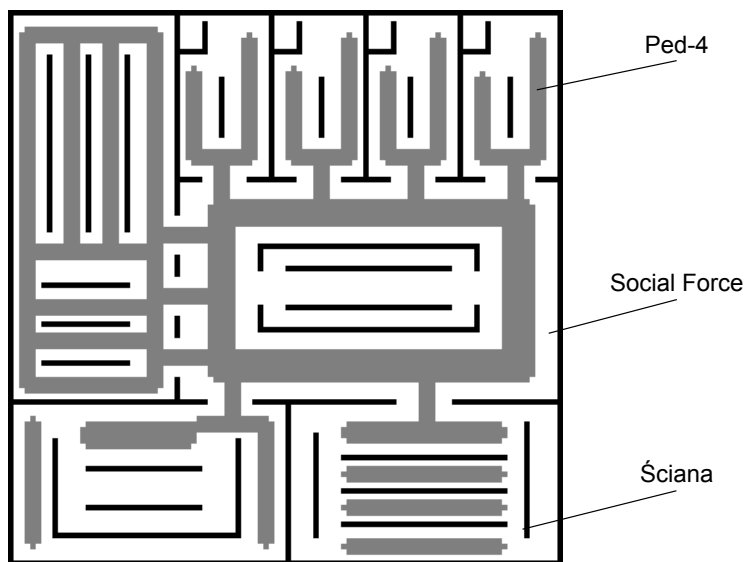
Algorytm **Social Force** opiera się na obserwacji, że każdy człowiek posiada wokół siebie (głównie przed sobą) tzw. *strefę komfortu*, w której niechętnie widzi osoby postronne. Po zsumowaniu stref komfortu wszystkich agentów otrzymuje się swoisty rozkład potencjału, na podstawie którego wyznaczany jest ich dalszy kierunek ruchu. Zasada, według której odbywa się ruch, jest prosta - dojść do celu po polach o jak najmniejszym potencjale. Jeśli w danym momencie brak jest dostępnych pól, pieszy “drepcze” w miejscu w oczekiwaniu na zwolnienie się któregoś z nich. Algorytm *Social Force* służy głównie do modelowania miejsc, w których ludzie “wałęsają się”, jak place czy wnętrza sklepów.

## 4 Implementacja

W celu wykonania projektu posłużono się językiem **Java** oraz bibliotekami **Java Swing** oraz **Monte Media Library**. Poniżej zawarto opis implementacji wybranych algorytmów i obiektów symulacji.

### 4.1 Reprezentacja centrum handlowego

Centra handlowe reprezentowane są za pomocą map bitowych (plików *.bmp*), których piksele kodują odpowiadające im komórki siatki symulacji, co pozwala tworzyć nowe rozkłady pomieszczeń i stref specjalnych w bardzo prosty i szybki sposób. Implementacja przewiduje istnienie dwóch map dla każdego centrum handlowego - mapę rozkładu pomieszczeń i algorytmów ruchu fazy operacyjnej (rysunek 10) oraz mapę rozkładu stref specjalnych centrum handlowego (rysunek 11).

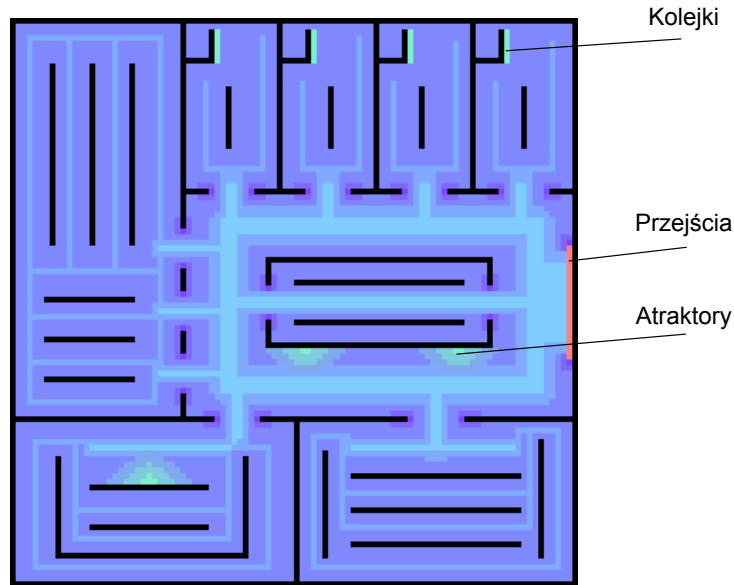


Rysunek 10: Przykładowy rozkład pomieszczeń i algorytmów ruchu małego centrum handlowego.

*Mapa rozkładu pomieszczeń* zawiera informacje o fizycznych właściwościach pomieszczeń modelowanego centrum handlowego - usytuowanie ścian i innych obiektów blokujących przejście. Dodatkowo zawarto na niej rozkład algorytmów ruchu wykorzystanych w fazie operacyjnej, co pozwala jednoznacznie określić położenie korytarzy, skrzyżowań i innych cech centrum handlowego związanych z ruchem agentów.

Wartości znaczące poszczególnych pixeli *RGB* mapy:

- $(0x00, *, *)$  - wartość zarezerwowana dla ścian i innych obiektów blokujących przejście.
- $(0x7F, *, *)$  - wartość determinująca wykorzystanie algorytmu Ped-4.
- $(0xFF, *, *)$  - wartość determinująca wykorzystanie algorytmu Social Force.



Rysunek 11: Przykładowy rozkład stref specjalnych małego centrum handlowego.

*Mapa rozkładu stref specjalnych* centrum handlowego zawiera informacje o funkcjonalnych cechach modelowanego centrum handlowego - rozmieszczenie miejsc przeznaczonych do czekania, kolejek przy kasach sklepowych, okien wystawowych i sieci routingu ułatwiającej przemieszczanie się w centrum handlowym. Informacje te wykorzystywane są przede wszystkim przez fazę taktyczną wykorzystanego algorytmu, gdzie są służą jako dodatkowa heurystyka algorytmu wyszukiwania ścieżek  $A^*$ .

Wartości znaczące poszczególnych pixeli *RGB* mapy:

- $(0x7F, A, H)$  - wartość oznaczająca uogólniony atraktor o *atrakcyjności*  $A$  i *czasie wstrzymania*  $H$ .
- $(0xFF, *, *)$  - wartość oznaczająca przejścia/wejścia, które odpowiednio tworzą lub usuwają agentów z symulacji.

Z racji ograniczonego czasu i niższego priorytetu implementacja nie uwzględnia istnienia wielu pięter w centrum handlowym - symulacja ruchu ludzi wewnątrz wielopiętrowego centrum handlowego może być traktowana jako wiele symulacji ruchu ludzi wewnątrz jednopiętrowego centrum handlowego.

## 4.2 Wybór punktów docelowych

*Punkty docelowe* reprezentują cele podróży agentów. Z racji mniejszego priorytetu i braku czasu algorytm wybiera zadaną ilość losowych miejsc znajdujących się we wnętrzu centrum handlowego, które następnie sortuje celem minimalizacji sumarycznej długości drogi je łączącej. Opisany sposób wyboru miejsc docelowych pozwala symulować wszystkie zachowania poruszających się ludzi na poziomie lokalnym (na przykład kolejkowanie się) i większość schematów zachowań tłumu na poziomie globalnym (z wyłączeniem bardziej abstrakcyjnych zachowań uwarunkowanych socjologicznie i kulturowo, takich jak różne stosunki ilościowe agentów danego typu w różnych częściach centrum handlowego).

### 4.3 Znajdowanie ścieżek

W celu wyznaczenia ścieżek prowadzących do punktów docelowych wykorzystano algorytm  $A^*$ .  $A^*$  jest algorytmem kompletnym, służącym do wyznaczenia najkrótszej drogi łączącej dwa wierzchołki grafu, który w każdym przypadku jest w stanie znaleźć drogę, jeśli takowa istnieje.  $A^*$  wykorzystuje heurystykę, która estymuje koszt ścieżki prowadzącej z danego wierzchołka do celu, starając się rozpatrywać tylko najbardziej obiecujące wierzchołki.

Algorytm przechowuje zbiory wierzchołków “otwartych” i “zamkniętych”, czyli odpowiednio, wierzchołków, które są rozpatrywane i tych, które już zostały sprawdzone. Działanie algorytmu rozpoczyna się od dodania aktualnej pozycji agenta do zbioru wierzchołków otwartych. W każdym następnym kroku algorytm wykonuje iteracyjnie następujące operacje:

- Ze zbioru wierzchołków otwartych wybierany jest najbardziej obiecujący wierzchołek  $x$ , minimalizujący funkcję  $f(x)$ :

$$f(x) = g(x) + h(x)$$

gdzie  $g(x)$  określa długość drogi prowadzącej z wierzchołka początkowego do wierzchołka  $x$ , a  $h(x)$  określa przewidywaną przez heurystykę długość drogi łączącej wierzchołek  $x$  i cel podróży.

- W przypadku osiągnięcia punktu docelowego algorytm kończy się sukcesem.
- W przeciwnym przypadku wierzchołek  $x$  dodawany jest do zbioru wierzchołków zamkniętych, a sąsiadujące z nim wierzchołki (wierzchołki osiągalne w jednym kroku zaczynając w  $x$ ), które nie należą do zbioru wierzchołków zamkniętych, dodawane są do zbioru wierzchołków otwartych.

Zależnie od zastosowanej heurystyki algorytm  $A^*$  jest w stanie dostarczać optymalne ścieżki łączące dwa punkty lub suboptymalne ścieżki, które są obliczane szybciej. Ze względu na rozwiązywany problem i brak wymogu dostarczania optymalnych ścieżek w implementacji zastosowano złożoną, dopuszczalną (*ang. admissible*) heurystykę opisaną w następnej sekcji, którą dodatkowo obciążono wagą  $\epsilon = 5$ , co pozwala szybko generować ścieżki o pożądanym i koszcie nie przekraczającym  $\epsilon$  razy kosztu ścieżki optymalnej.

### 4.4 Dewiacja ścieżek

Dewiacja ścieżek zachodzi podczas działania algorytmu wyszukiwania ścieżek opisanego w poprzedniej sekcji celem ułatwienia zachodzenia pewnych zachowań, takich jak poruszanie się w odpowiedni sposób po korytarzach centrum handlowego. Odpowiednia dewiacja ścieżek została osiągnięta przez modyfikację heurystyki zastosowanego algorytmu  $A^*$  - każdy fragment mapy rozkładu stref specjalnych centrum handlowego posiada przypisaną mu wartość determinującą parametry **uogólnionego atraktora** - *atrakcję*  $A$  oraz *czas wstrzymania*  $H$ .

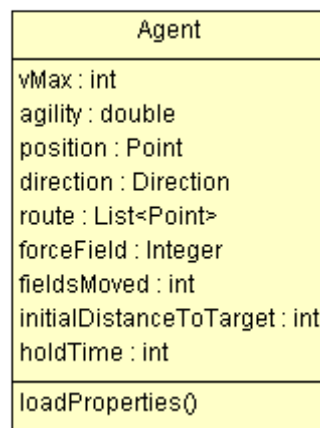
*Atrakcja* odpowiada za przyciąganie agentów do pewnych stref centrum handlowego i ma za zadanie przede wszystkim umożliwić realizację zdefiniowanych przy analizie problemu atraktorów. Jej wartość kodowana jest przez komponent  $G$  pixeli  $RGB$  mapy rozkładu stref specjalnych centrum handlowego, kodujących atraktory (komponent  $R$  równy  $0x7F$ ). Wartość komponentu  $G$  należy podzielić przez  $0x7F$  celem przeskalowania do przedziału  $[0, 2)$ . Heurystyka algorytmu  $A^*$  wykorzystuje tę wartość, jako dodatkowy mnożnik estymowanego kosztu ścieżki, toteż wartość 0 oznacza najsilniejszą atrakcję, wartość 1 brak atrakcji natomiast wartość 2 oznacza odpychanie - algorytm wyszukiwania ścieżek będzie preferował inne drogi.

*Czas wstrzymania* odpowiada za opóźnianie agentów podczas wykonywania ruchu - agent osiągnący komórkę siatki symulacji obarczoną czasem oczekiwania zostaje opóźniony na zadaną ilość czasu. Wartość czasu wstrzymania kodowana jest przez komponent *B* pixeli *RGB* mapy rozkładu stref specjalnych centrum handlowego, kodujących atraktory. Wartość tego komponentu traktowana jest jako ilość kroków symulacji, na które opóźniany agent zostanie wstrzymany.

Implementacja *uogólnionego atraktora* okazała się na tyle elastyczna, że wyeliminowała konieczność osobnej implementacji kolejek i opóźniaczy - kolejki realizowane są jako linie znacząco zwiększonej atrakcji o krótkim czasie wstrzymania, natomiast opóźniacze są punktami o znacząco zwiększonym czasie wstrzymania. Atraktory zostały zrealizowane jako gradienty zwiększającej się atrakcji i czasu wstrzymania - agenci odwiedzający atraktor spędzają w nim tym więcej czasu, im bliżej jego centrum się znajdują. Dodatkowym atutem zastosowanej implementacji jest możliwość routingu agentów w centrum handlowym. Wszystkie formy stref specjalnych wyrażonych przez modyfikację heurystyki algorytmu A\* zostały zawarte na pogładowym rysunku 11.

## 4.5 Reprezentacja agentów

Na chwilę obecną agenci opisywani są przez parametry wpływające tylko i wyłącznie na ich ruch w fazie operacyjnej. Docelowo planowane jest rozszerzenie ich zachowania o preferencje dotyczące odwiedzanych miejsc, czasu spędzanego w galerii itp.



Rysunek 12: Klasa agenta

Znaczenie poszczególnych parametrów:

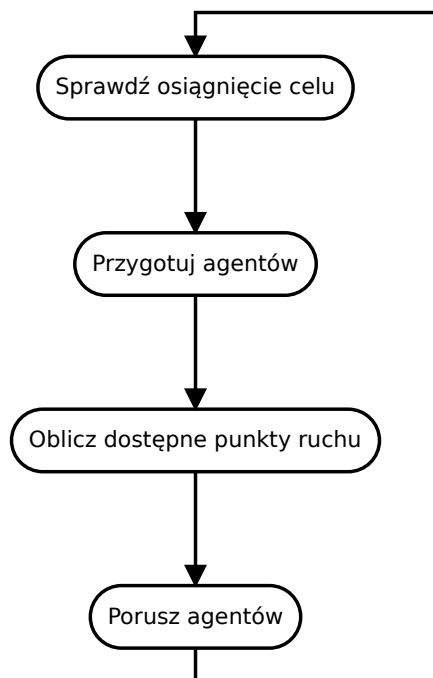
- **vMax** – maksymalna ilość punktów ruchu do wykorzystania w danej iteracji fazy operacyjnej
- **agility** – skłonność do dokonywania zamian z innymi podczas etapu poruszania agentów
- **position** – położenie agenta na planszy galerii
- **direction** – aktualny kierunek ruchu (dostępne kierunki są zgodne ze stronami świata)
- **route** – lista współrzędnych płytek-celów do odwiedzenia
- **forceField** – opis wartości potencjału pól wokół agenta (przy założeniu, że agent zwrócony jest w kierunku północnym)

- **fieldsMoved** – odległość (mierzona w płytkach) przebyta od ostatniego celu do danej chwili
- **initialDistanceToTarget** – teoretyczna minimalna odległość od poprzedniego do obecnego celu
- **holdTime** – pozostały czas oczekiwania (np. w kolejce)

Część spośród powyższych parametrów agenta inicjalizowana jest na podstawie plików zawierających opisy pewnych ogólnych charakterystyk ludzi, np. "typ dynamiczny" oznacza człowieka poruszającego się szybko i skłonnego do dokonywania zamian, "typ emeryta" oznacza statyczny krok i niechęć do zamian.

## 4.6 Ruch agentów i Ped-4

Faza operacyjna składa się z czterech wykonywanych w pętli etapów, co zilustrowano na poniższym schemacie:



Rysunek 13: Pętla fazy operacyjnej

Sprawdzanie osiągnięcia celu służy wyznaczeniu kolejnego celu, o ile poprzedni został osiągnięty. Cel można osiągnąć na dwa sposoby: wchodząc bezpośrednio na płytkę o zadanych współrzędnych bądź wchodząc na płytkę w sąsiedztwie celu (w tym przypadku prawdopodobieństwo uznania celu za osiągnięty zależy od odległości płytki od niego). Po wyznaczeniu nowego celu aktualizowane są parametry wykorzystywane przez algorytmy ruchu, jak początkowa (teoretyczna) minimalna odległość od celu.

Przygotowanie agentów polega na wywołaniu dla każdego z nich metody *prepare()* algorytmu przypisanego do płytki, na której agent aktualnie się znajduje.

Obliczanie dostępnych w danym obiegu fazy iteracyjnej punktów ruchu to przepisanie aktualnej prędkości maksymalnej każdego z agentów.

W etapie poruszania agentów agenci rozpatrywani są cyklicznie. W jednej iteracji ("kroku") każdy z agentów może wykonać tylko jedną akcję, np. czekać bądź przemieścić się o jedno (!) pole. Dzięki takiemu rozwiązaniu żaden z agentów nie jest faworyzowany przy dostępie do pól.



---

**Algorithm 1** Faza operacyjna

---

```
procedure OPERATION_PHASE
  for all agent w galerii do                                     ▷ sprawdź osiągnięcie celu
    if agent osiągnął cel OR agent uznał, że osiągnął cel then
      pobierz kolejny cel z listy
      zapisz statystyki dotyczące dalszej drogi
    end if
  end for

  for all agent w galerii do                                     ▷ przygotuj agentów
    call Algorithm.prepare with agent
  end for

  for all agent w galerii do                                     ▷ oblicz punkty ruchu
    punkty_ruchu_agenta  $\leftarrow$  predkosc_agenta
  end for

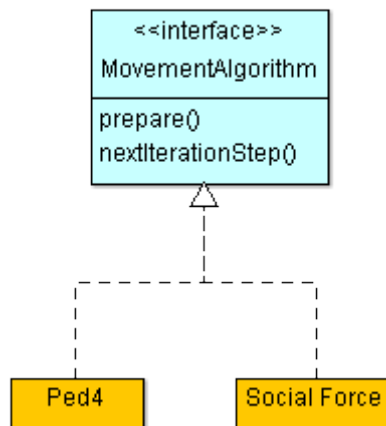
  for krok od 1 do  $v_{max}$  do                                     ▷ porusz agentów
    for all agent w galerii do
      if agent jest wstrzymywany then
        zmniejsz pozostały czas wstrzymania
      else if agent nie wykorzystał jeszcze w tym kroku punktów ruchu then
        call Algorithm.nextIterationStep with agent
        call Feature.performAction with agent
        wykorzystaj punkt ruchu
      end if
    end for
  end for
end procedure
```

---

Metoda *performAction()*, wywoływana dla elementów galerii, ustawia parametry agenta związane z symulacją takich zdarzeń, jak np. oczekiwanie w kolejce.

Wszystkie algorytmy ruchu implementują interfejs *MovementAlgorithm*. Interfejs ten zawiera dwie metody wywoływane w fazie operacyjnej dla każdego agenta:

- *prepare()* - wywoływana jeden raz, na początku; służy ustawieniu agenta na odpowiedniej pozycji początkowej
- *nextIterationStep()* - wywoływana tyle razy, ile agent posiada punktów ruchu; obsługuje ruch "do przodu"; przy każdym jej wywołaniu agent przesuwa się co najwyżej o jedno pole (w sąsiedztwie Moore'a)



Rysunek 14: Interfejs *MovementAlgorithm* i jego realizacje

## 4.7 Social Force

Poniżej przedstawiono pseudokody metody odpowiedzialnej za ruch "do przodu" w algorytmie Social Force:

Funkcja wyznaczająca dostępne pola ogranicza możliwość ruchu tak, aby agent albo dalej przemieszczał się po dotychczasowej trajektorii, albo skręcił w stronę celu.

Potencjał pola obliczany jest na podstawie siły oddziaływania innych ludzi (ujemna składowa) oraz odległości pola od celu (dodatnia składowa). W przypadku, gdy agent już dość długo zmierza do celu (tzn. przebyta przez niego droga znacząco przekracza minimalną drogę konieczną do osiągnięcia celu), lecz nie może go osiągnąć, przestaje zwracać taką uwagę na innych agentów – efekt ten został osiągnięty przez dodatkowe zwiększenie potencjału dostępnej płytki leżącej najbliżej celu.

W przypadku, gdy brak jest dostępnych płytek, agent obraca się odrobinę w miejscu, by w następnym kroku zyskać nowe możliwości ruchu (ze względu na zmianę zbioru dostępnych płytek).

---

**Algorithm 2** Ruch agenta w algorytmie Social Force

---

**procedure** NEXTITERATIONSTEP

**if** brak możliwości ruchu **then**

        obróć agenta

        ▷ umożliwia przeszukiwanie nowych obszarów

**else**

        cel  $\leftarrow$  wyznacz\_pole\_o\_najwiekszym\_potencjale()

        przesuń agenta na docelową płytkę

        odzwierciedl kierunek wykonanego ruchu poprzez zmianę zwrotu agenta

**end if**

**end procedure**

**function** WYZNACZ\_POLE\_O\_NAJWIEKSZYM\_POTENCJALE

    dostępne\_pola  $\leftarrow$  wyznacz\_dostępne\_pola()

**for all** dostępne pole **do**

        uwzględnij wartość pola potencjału innych ludzi i odległość od celu

**end for**

**if** agent jest zmęczony **then**

        zwiększ dodatkowo potencjał dostępnego pola najbliższej celu

**end if**

    pozostaw pola o najwyższym potencjale

**return** pole leżące najbliższej celu

**end function**

**function** WYZNACZ\_DOSTĘPNE\_POLA

    pola\_agenta  $\leftarrow$  pola w sąsiedztwie von Neumanna leżące w półkolu wyznaczonym przez kierunek ruchu agenta

    pola\_celu  $\leftarrow$  pola w sąsiedztwie von Neumanna leżące w półkolu wyznaczonym przez kierunek do celu

**return** pola\_agenta AND pola\_celu

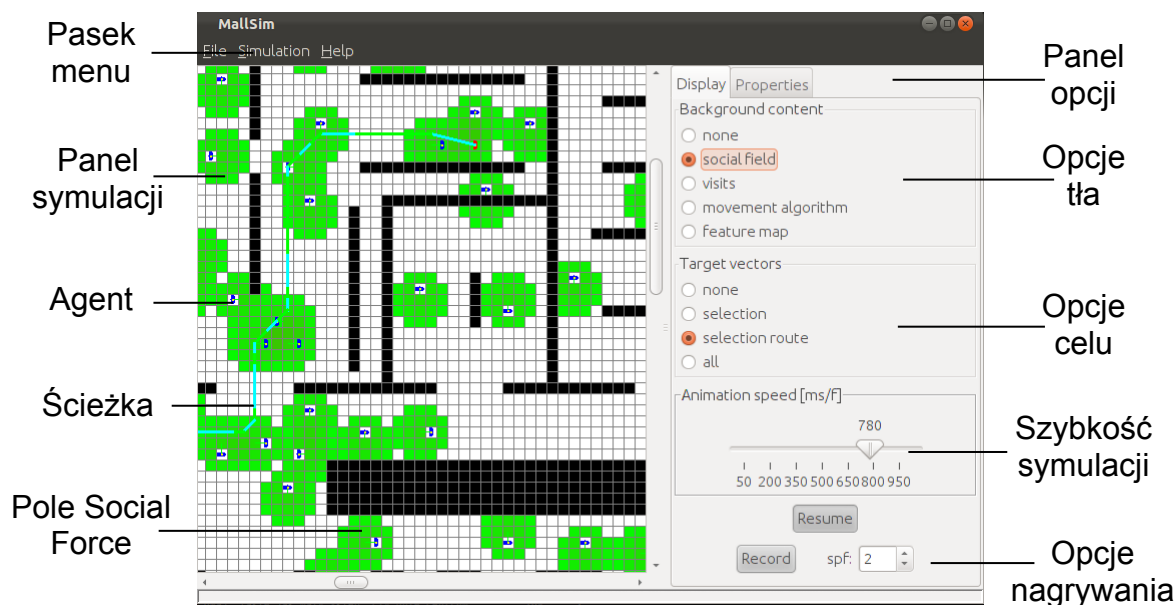
▷ część wspólna zbiorów

**end function**

---

## 4.8 Wizualizacja i pozyskiwanie danych

Wizualizację przebiegu symulacji wykonano w oparciu o bibliotekę **Java Swing** z racji na prostotę implementacji i zadowalające efekty wizualne, jakie ona dostarcza. Na rysunku 15 zaprezentowano wygląd głównego okna programu podczas przykładowej symulacji.



Rysunek 15: Główne okno programu.

Program udostępnia wiele konfigurowalnych opcji odpowiadających za działanie symulacji i jej wizualizacji dostępnych za pośrednictwem *panelu opcji*:

- **Opcje tła** - wybór danych wizualizowanych w tle symulacji; do wyboru jedna wartość z: *brak*, *gradient Social Force*, *rozkład odwiedzin danych komórek centrum handlowego*, *rozkład algorytmów ruchu*, *rozkład stref specjalnych centrum handlowego*.
- **Opcje celu** - opcje wizualizacji celu podróży agentów; do wyboru jedna wartość z: *brak*, *wektor najbliższego celu wybranego agenta*, *aktualna ścieżka wybranego agenta*, *wektory najbliższego celu wszystkich agentów*.
- **Szybkość symulacji** - pasek wyboru szybkości symulacji (ilość milisekund na krok symulacji); wartości z przedziału 50 do 1000 milisekund.
- **Opcje nagrywania** - opcje odpowiadające za nagrywanie przebiegu symulacji; obecnie dostępna jest tylko konfiguracja ilości kroków na klatkę filmu (*spf*).

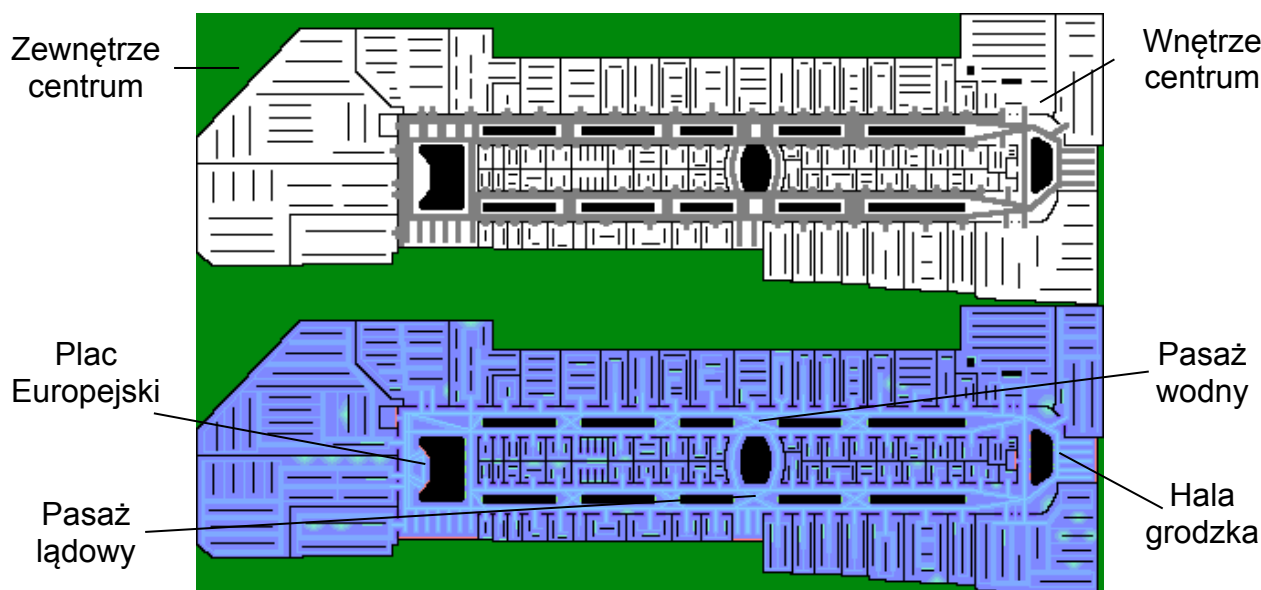
...oraz *paska menu*:

- **Seed** - opcje odpowiadające za *ziarno* symulacji umożliwiające kontrolowanie powtarzalności wyników.

W celu ułatwienia pozyskiwania danych do późniejszej analizy program udostępnia zakładkę *Properties* generującą dynamicznie podgląd parametrów wybranego agenta oraz możliwość nagrania przebiegu symulacji za pomocą biblioteki **Monte Media Library** - przebieg symulacji zapisywany jest w głównym katalogu programu w formacie *.avi*.

## 5 Symulacja i analiza wyników

W celu przetestowania poprawności modelu i działania programu zdecydowano się przeprowadzić symulację lokalnego centrum handlowego - *Galerii Krakowskiej*. Przygotowano mapy parteru centrum zaprezentowane na poniższej ilustracji:



Rysunek 16: Mapy parteru popularnej *Galerii Krakowskiej*.

Ze względu na brak dostępu do danych i dynamiczne zmiany faktycznych rozkładów sklepowych półek i alejek mapy parteru symulowanego centrum handlowego, przedstawione na rysunku 16, zawierają przykładowe, proste układy półek sklepowych - wizję autorów projektu.

### 5.1 Kalibracja i walidacja parametrów symulacji

W celu kalibracji i walidacji parametrów modelu posłużono się obserwacjami przeprowadzonymi w symulowanym centrum handlowym w wolnym czasie. W związku z faktem, iż model zastosowany w tej pracy niewiele parametrów wymagających kalibracji, z których większość jest trudna, bądź niemożliwa do oszacowania bez dużej porcji danych statystycznych kalibrację przeprowadzono w dużej mierze “metodą prób i błędów” w oparciu o dane zebrane z obserwacji. Udało się w ten sposób zidentyfikować trzy typy agentów odwiedzających centrum handlowe (dynamiczny, przeciętny i “pensjonariusz”), które różnią się maksymalną prędkością poruszania, chęcią do omijania innych agentów, czy wytrwałością w robieniu zakupów.

Po skalibrowaniu parametrów dotyczących zachowania agentów przystąpiono do kalibracji parametrów centrum handlowego, wyrażonych w większości przez mapę rozkładu stref specjalnych centrum handlowego, która jest wykorzystywana przez algorytm wyszukiwania ścieżek. Kalibracja przebiegała ze względu na dwa kluczowe aspekty symulacji - czas generowania ścieżek oraz zachodzenie abstrakcyjnych zjawisk opisanych w następnej sekcji. Kalibrację ponownie przeprowadzono w oparciu o dane pochodzące z własnych obserwacji i “zrównowoczonego rozsądku”, niestety administracja *Galerii Krakowskiej* nie udzieliła autorom pracy dostępu do istotnych danych, które umożliwiłyby stworzenie lepszej mapy rozkładu stref specjalnych, która dokładniej oddawałaby rzeczywisty charakter *Galerii Krakowskiej*.

Walidację opracowanych parametrów przeprowadzono konfrontując wyniki symulacji z rzeczywistymi doświadczeniami wyniesionymi z symulowanego centrum handlowego. Porównanie wyników symulacji do poczynionych obserwacji rzeczywistego zachowania ludzi zawarto w następnych sekcjach.

## 5.2 Uzyskane wyniki ilościowe i jakościowe

Uzyskane wyniki spełniają wszystkie założenia postawione w sekcjach 2 i 3 i są bardzo zbliżone do rzeczywistych zachowań ludzi w centrum handlowym. Agenci poruszają się zgodnie z wytyczonymi ścieżkami, które dobierane są w taki sposób, by dany agent odwiedził wiele sklepów w centrum handlowym:



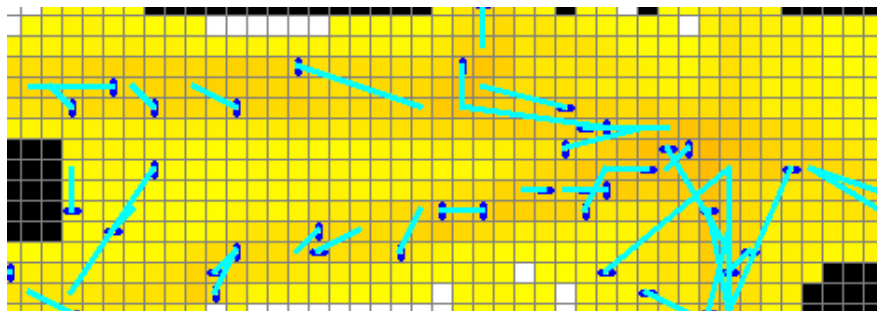
Rysunek 17: Wybrana przez algorytm ścieżka prowadząca agenta po centrum handlowym.

Modeluje to strategiczne plany ludzi, którzy odwiedzając centrum handlowe przeważnie planują spędzić tam więcej czasu. Opisany w sekcji 4.3 algorytm wyboru ścieżek prowadzi do powstania realistycznego routingu ludzi w centrum handlowym:



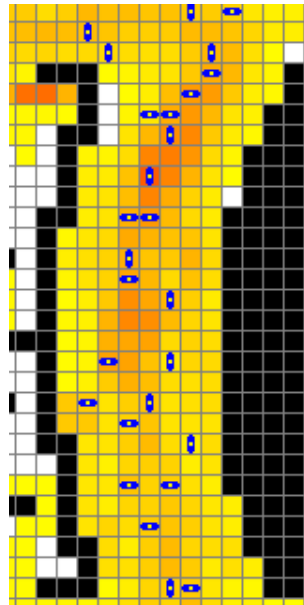
Rysunek 18: Realistyczny routing agentów w centrum handlowym.

Spontanicznie tworzą się pasy ruchu, którymi ludzie podążają do celu swojej podróży:



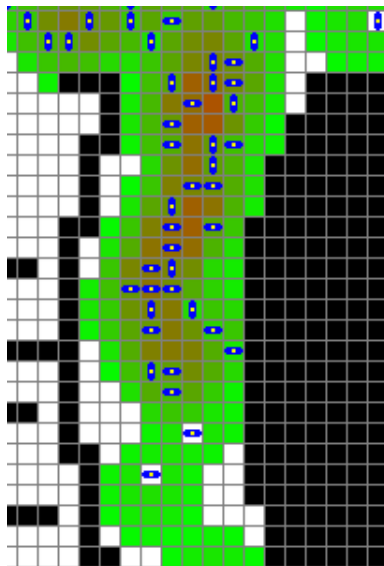
Rysunek 19: Samoistne tworzenie się pasów ruchu.

Zupełnie jak w prawdziwym centrum handlowym, agenci preferują poruszanie się środkiem korytarza w miarę możliwości, o czym świadczy większa wartość “temperatury” na środku poniższej ilustracji:



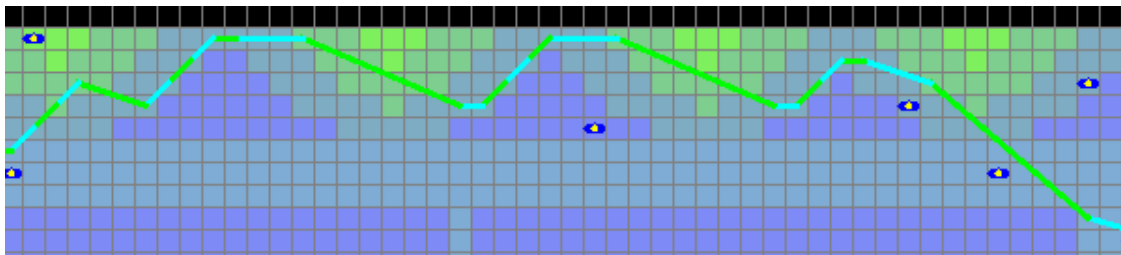
Rysunek 20: Agenci preferujący środek korytarza.

Takie zachowanie prowadzi do tworzenia się skupisk ludzi (*ang. flocking*), co wpływa na preferencje odległościowe zaangażowanych agentów i zmianę ich gradientów *Social Force*. Zmiana ta pociąga za sobą rozładowanie zatoru - model osiąga stabilność automatycznie się regulując:



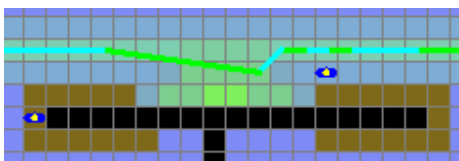
Rysunek 21: Samoistne tworzenie się zgrupowań ludzi - *flocking*.

Równie interesujące jest powstawanie abstrakcyjnych zachowań wymienionych w sekcji 2. Algorytm fazy taktycznej uwzględnia *atrakcję* agentów do różnych, interesujących stref centrum handlowego, co zaprezentowano na rysunku 22.



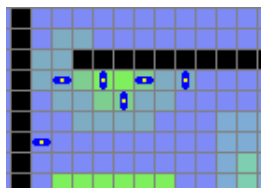
Rysunek 22: Uwzględnianie miejsc przyciągających uwagę w ścieżce agenta.

Obserwować można naturalne zachowania, takie jak zatrzymanie się przed oknem wystawowym, często obserwowane w prawdziwych centrach handlowych:



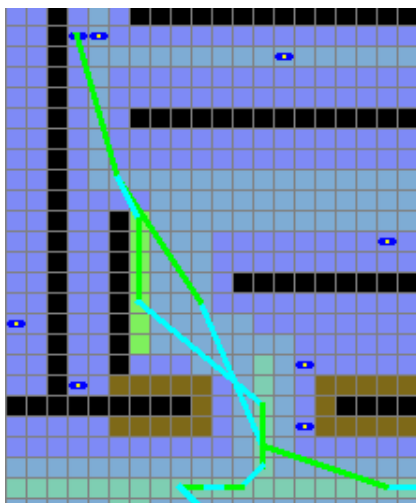
Rysunek 23: Charakterystyczne złoczenie z trasy celem osiągnięcia atraktora.

Agenci bardzo chętnie grupują się by obserwować różne ciekawe zjawiska obecne w symulowanym centrum handlowym - wszystko dzięki umieszczonym tam atraktorom:



Rysunek 24: Agenci w obrębie atraktora.

Kolejki, podobnie jak atraktory, brane są pod uwagę już w fazie taktycznej działania algorytmu - agenci dokonujący zakupu podchodzą do kasy i oczekują na obsługę imitując zachowanie prawdziwych ludzi:



Rysunek 25: Uwzględnianie sklepowych kas i kolejek w ścieżce agenta.

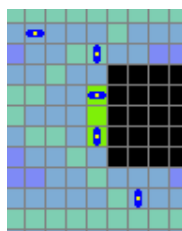


Zachowanie to udało się osiągnąć pomimo działania algorytmu Social Force, który nakazuje agentom trzymanie dystansu do siebie nawzajem:



Rysunek 26: Agenci oczekujący na swoją kolej.

W podobny sposób osiągnięto wstrzymanie agentów - symulujące wszelkiego rodzaju odpoczynki i czasy oczekiwania zdarzające się w centrum handlowym:



Rysunek 27: Agenci odpoczywający na ławce (w obrębie opóźniacza).

Interesującym jest fakt, iż nawet pomimo zastosowania skomplikowanych algorytmów routingu i wyszukiwania ścieżek udało się otrzymać niemal stu procentowe pokrycie centrum handlowego. Agenci bezproblemowo osiągają wszystkie jego pomieszczenia, co doskonale oddaje charakterystyki prawdziwego centrum handlowego i zachowanie ludzi tam obecnych.



Rysunek 28: Pokrycie centrum handlowego.

Dodatkowo do dokumentacji projektu załączono kilka filmów pokazujących działanie symulacji i powstawanie wyżej opisanych zachowań:

- **overview.avi** - Prezentacja różnych aspektów wizualizacji symulacji: zbliżanie, oddalanie, przesuwanie planu galerii, rozkład pola potencjału, mapa “temperatury” (licznik odwiedzin pól).
- **movement.avi** - Przykład formowania się “pasów ruchu” na prostych odcinkach korytarza (górna część animacji) dzięki użyciu algorytmu Ped-4. Problemy ze współistnieniem obok siebie algorytmów Ped-4 i Social Force (patrz: ruch agentów po wygiętych w łuk korytarzach) - piosi zawracają bądź “kręcą się w kółko” powodując zator.
- **queue\_attractor.avi** - Działanie kolejek (po prawej stronie) oraz atraktorów (w środku i po lewej stronie) - agenci chętnie zbliżają do takich stref. Wejście na atraktor albo kolejkę powoduje wstrzymanie agenta na określony czas.

- **social\_force.avi** - Przykład omijania innych klientów z uwzględnieniem stref komfortu dzięki zastosowaniu algorytmu Social Force.
- **visits.avi** - Animacja pokazująca przepływ ludzi w galerii handlowej. Wyraźnie widać duży, skoncentrowany ruch po korytarzach oraz niewielki i rozproszony ruch po obszarach sklepów.
- **wall\_error.avi** - Przykład błędów wyznaczania ścieżki skutkujący niemożliwością osiągnięcia wyznaczonego celu z powodu natrafienia na ścianę. Przyczyną jest przedwczesne uznanie wcześniejszego celu (leżącego w tym przypadku na szczycie ściany) za osiągnięty oraz wyznaczenie kolejnego celu w miejscu niewidocznym z pozycji agenta w chwili uznania poprzedniego celu za osiągnięty.

### 5.3 Wyniki symulacji a rzeczywistość

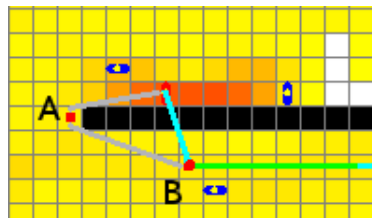
Wyniki symulacji dość dobrze oddają charakter zjawisk obserwowanych w rzeczywistej galerii handlowej.

W korytarzach obserwujemy formowanie się “pasów ruchu” - ludzie starają się iść jeden za drugim w kolumnie, próbują wyprzedzać się tylko wtedy, gdy nie nadchodzi nikt z naprzeciwka. We wnętrzach sklepów dzieje się na odwrót - brak pośpiechu sprawia, że klienci większą wagę przywiązują do nie naruszania swoich stref komfortu.

Na podglądzie odwiedzonych płytek widzimy, że klienci preferują ruch środkiem korytarzy, jednak gdy zajdzie taka konieczność korzystają z całej jego dostępnej szerokości.

W przypadku sklepów rozkład odwiedzanych miejsc jest znacznie bardziej równomierny, czego również można było oczekiwać - wewnątrz sklepu (o ile nie jest to dyskont spożywczy) klient poroźgląda się i zapoznaje z ofertą sklepu, a uwagę różnych osób przyciągają różne produkty. Warto również zauważyć, że w przypadku niewielkich sklepów (typu: 101 drobiazgów, Świat Kawy i Herbaty) stosunkowo niewielu klientów wchodzi głębiej do środka - większość po wejściu rozgląda się chwilę i wychodzi. Zachowanie takie jest często obserwowane w galeriach handlowych.

Analiza wyników symulacji wykazała również konieczność dalszej kalibracji (oraz ewentualnie częściowej zmiany metodologii) procesu wyznaczania ścieżek. Na chwilę obecną nie udało się w pełni wyeliminować niekorzystnego zjawiska “forsowania ściany” przez agentów spowodowanego równoczesnym wystąpieniem dwóch zdarzeń: przedwczesnym uznaniem celu za osiągnięty oraz wyznaczeniu kolejnego celu w miejscu niewidocznym z aktualnej pozycji agenta. Przykład takiej sytuacji pokazano poniżej: jeśli agent uzna punkt *A* za osiągnięty jeszcze przed ominięciem ściany, wektor celu prowadzący do punktu *B* spowoduje ruch agenta wzdłuż ściany i próbę jej późniejszego “sforsowania”.



Rysunek 29: Forsowanie ściany przez wybranego agenta.

## 6 Literatura

- [Wąs, Gudowski, Matuszyk 2006] - Social Distances Model of Pedestrian Dynamics
- [Karakayali 2009] - Social Distance and affective orientation
- [Blue, Adler 2000] - Modelling Four Directional Pedestrian Movements
- [Blue, Adler 2001] - Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways
- [Bitgood, Dukes 2005] - Economy of Movement and Pedestrian Choice Point Behavior in Shopping Malls
- [Borgers, Timmermans 1986] - A Model of Pedestrian Route Choice and Demand for Retail Facilities within Inner-City Shopping Areas
- [Borgers, Timmermans 1986] - City centre entry points, store location, patterns and pedestrian route choice behaviour: a microlevel simulation model
- [Borgers, Timmermans 2005] - Modelling pedestrian behaviour in downtown shopping areas
- [Kitazawa, Batty 2004] - Pedestrian Behaviour Modelling - An Application to Retail Movements using a Genetic Algorithm
- [Zacharias 2000] - Shopping behavior at Alexis-Nihon Plaza in Montreal
- [Rauh, Schenk, Schrödl 2011] - The Simulated consumer - an agent-based approach to shopping behaviour
- [Helbing 1992] - A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians