



**AGH**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W  
KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ

Praca dyplomowa inżynierska

*Symulacja dynamiki pieszych z wykorzystaniem modelu  
Social Force.*

*Simulation of pedestrian dynamics using Social Force  
Model.*

Autor:

*Michał Gandor*

Kierunek studiów:

*Informatyka*

Opiekun pracy:

*dr hab. inż. Jarosław Wąs*

Kraków, 2017

*Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.*

*Serdecznie dziękuję ...tu ciąg dalszych  
podziękowań np. dla promotora, żony, są-  
siada itp.*



# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b>	7
1.1. Cele pracy	8
1.2. Zawartość pracy	8
1.3. Zastosowanie symulacji komputerowych	8
<b>2. Wykaz ważniejszych oznaczeń</b>	9
<b>3. Wprowadzenie teoretyczne</b>	11
3.1. Klasyfikacja modeli symulacji ruchu pieszych	12
3.1.1. Modele mikroskopowe oraz makrospokope	12
3.1.2. Modele ciągłe i dyskretne	12
<b>4. Wyznaczenie ścieżki</b>	15
<b>5. Opis modelu Social Force</b>	17
5.1. Desired force	19
5.2. Interakcja pomiędzy pieszymi	20
<b>6. Charakterystyka ruchu pieszych</b>	23
6.1. Points of interest	23
6.2. Strefa prywatna	23
6.3. Czas relaksacji	23
6.4. Czekający piesi	23
6.5. Formowanie strug	23
<b>7. Środowisko testowe</b>	25
<b>8. Testy</b>	27
<b>9. Podsumowanie</b>	29
9.1. Wnioski	29
9.2. Napotkane problemy	29



# 1. Wprowadzenie

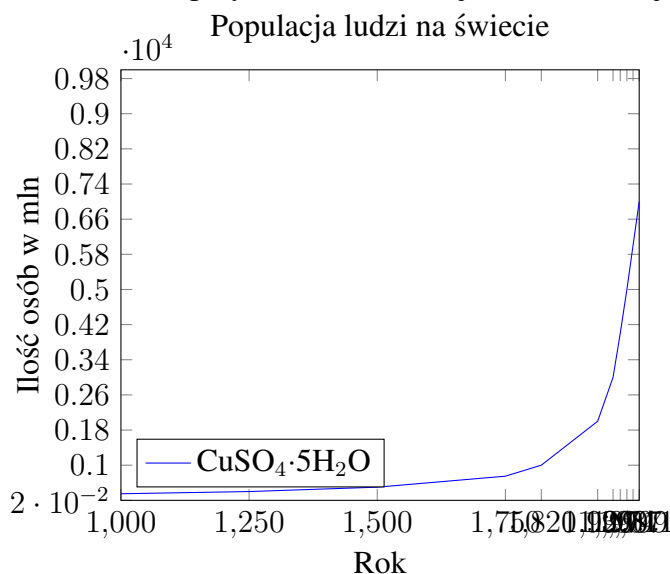
Jesteśmy obecnie świadkami rozrostu miast, budowy kompleksów sportowych czy galerii handlowych. Wszystkie te miejsca są nieodłącznie związane z tłumami przewijających się przez nie osób. W związku z rosnącą gęstością zaludnienia oraz wzrostem zagrożeń takich jak terroryzm tworzenie symulacji ewakuacji nabrało większego znaczenia.

W ostatnich dekadach ilość wypadków związanych ze złym planowaniem ewakuacji wzrosła. Katastrofy takie jak tragedia w Hillsborough w roku 1989 (96 ofiar) czy wybuch paniki na Love Parade w Duisburgu w roku 2010 (21 ofiar) pokazują, że efektywność ewakuacji stała się kluczowym aspektem bezpieczeństwa w miejscach publicznych takich jak stadiony, stacje metra czy lotniska. Symulacje mogą mieć wielorakie zastosowanie, począwszy od wspomnianej ewakuacji ludności poprzez badanie zachowań w centrach handlowych kończąc na ruchu drogowym. Dzięki zasymulowaniu zachowania tłumu możemy łatwiej utworzyć plany ewakuacyjne na wypadek zagrożenia minimalizując szkody oraz ofiary. Pozwalają one także na lepsze rozładowanie ruchu drogowego w miastach o rosnącej gęstości zaludnienia.

Na przejściach dla pieszych w Japonii ginie 30% osób uczestniczących w wypadkach drogowych [2], a w Niemczech odsetek ten wynosi 15% [German instigute for econeomic research 2010]. Zgodnie z danymi organizacji Fire Administration w Stanach Zjednoczonych [3] w roku 2007 3430 osób zmarło w pożarach oraz blisko 18 tysięcy zostało rannych. Biorąc pod uwagę te dane łatwo dojść do wniosku jakie korzyści mogą płynąć z symulacji zachowania pieszych.

Zachowanie tłumu badane jest od przeszło trzech dekad. Na samym początku badania były traktowane w ramach ciekawostki. W ostatnich czasach symulacje ruchu pieszych zyskały na popularności. Głównie za sprawą analogii do zachowania gazów oraz płynów [1]. Wraz z nowatorskimi pracami Helbinga .... Modelowanie ruchu pieszych odgrywa ponadto dużą rolę w projektowaniu, dostarcza wielu informacji użytecznych podczas planowania miejsc użyteczności publicznej. Znajomość problemów podczas ewakuacji, sytuacji konfliktowych pomiędzy pieszymi jest kluczowa w projektowaniu nowych budynków. W przypadku małych budynków

łatwo można przeprowadzić próbne ewakuacje, jednakże kiedy w grę wchodzi duże kompleksy nie jest to możliwe. Nawet próba z małą ilością osób nie pokaże skali problemu. Nie jesteśmy wówczas w stanie przykładowo zbadać jak na ewakuacje wpłynie rosnąca gęstość tłumu.



## 1.1. Cele pracy

Głównym celem pracy jest implementacja oraz zasymulowanie zachowania pieszych używając metody Social Force. Symulacja ruchu pieszych skupia się na zbadaniu zachowania ludzi dla dużych populacji w małych przestrzeniach. Zaproponowany model pozwala na opisanie każdej osoby z osobna biorąc pod uwagę jej indywidualne cechy takie jak prędkość ruchu czy masę. Symulacja bierze pod uwagę także aspekty psychologiczne oraz socjologiczne jakie można nakreślić badając zachowanie tłumu

## 1.2. Zawartość pracy

Rozdział 1, 1: przedstawiono podstawowe informacje dotyczące symulacji komputerowych z ruchem pieszych. Kolejny rozdział poświęcony jest porównaniu istniejących rozwiązań pomagających takie symulacje zaimplementować.

Rozdział 2, 3: nakreślone zostają teoretyczne aspekty symulacji

## 1.3. Zastosowanie symulacji komputerowych



## 2. Wykaz ważniejszych oznaczeń

Celem poniższej pracy jest zapoznanie studentów z systemem  $\text{\LaTeX}$  w zakresie umożliwiającym im samodzielne, profesjonalne złożenie pracy dyplomowej w systemie  $\text{\LaTeX}$ .



### 3. Wprowadzenie teoretyczne

Dziedziny nauki badające ruch pieszych to nie tylko informatyka. Na powstanie modeli miały także wpływ prace uczonych z takich dziedzin jak psychologia, socjologia czy architektura. Problem zachowania tłumu jest skomplikowany i dopiero połączenie tych wszystkich dziedzin dało początek realnemu odzwierciedleniu na ekranie komputera.

Z pozoru zachowanie pieszych może wydawać się chaotyczne oraz trudne do przewidzenia. Bazując jednak na badaniach i obserwacjach takie zachowania mają miejsce tylko w skrajnych przypadkach. W codziennym życiu okazuje się, że model do opisu zachowania tłumu może być w dość prosty sposób opisany, głównie dzięki prawdopodobieństwom jakie mogą zostać nakreślone w dużych populacjach ludzi. Człowiek ma tendencję do podejmowania decyzji na bazie posiadanej już wcześniej, wypracowanej wiedzy na temat otaczającego go środowiska. Oznacza to, że reakcje na innych pieszych oraz przeszkody mogą być w łatwy sposób przewidziane. Analogią do takiego zachowania mogą być przykładowo reakcje profesjonalnego kierowcy wyścigowego, który reaguje na sytuacje drogowe niemal automatycznie.

Oczywiście nie jest to prawdą w każdej sytuacji. Przykładowo dzieci oraz turyści wykazują inny sposób poruszania się za względu na to, że zazwyczaj znajdują się w nowym miejscu i nie mają wypracowanej strategii poruszania się. Jednakże dla potrzeb symulacji nie potrzeba dokładnych informacji o każdym z pieszych. W zupełności wystarcza statystyczna wartość konkretnych zachowań

W tym rozdziale zostają przedstawione podstawowe dostępne obecnie modele. Każdy z modeli ma swoje zalety oraz wady, wpływają na to cechy takie jak złożoność obliczeniowa, złożoność implementacji oraz oczywiście cechy otrzymanych rezultatów.

## 3.1. Klasyfikacja modeli symulacji ruchu pieszych

### 3.1.1. Modele mikroskopowe oraz makrospokope

Modele makroskopowe pokazują w głównej mierze dynamikę gęstości oraz prędkości całego tłumu. W tym celu używane są istniejące już modele fizyczne takie jak dynamika płynów, które zostają odpowiednio dostosowane do potrzeb symulacji. Przykładem może być hydrodynamiczny model Paulusa opierający się na równaniach przepływu [Architektura Modelowania]. Modele te nie biorą pod uwagę indywidualnych zachowań jednostki.

Podejście makrospokowe ze względu na odzwierciedlanie całej populacji sprawdza się w praktyce tylko w wąskim wachlarzu zastosowań.

Jako zaletę podejścia makroskopowego możemy z pewnością wskazać mniejszą ilość obliczeń potrzebną do uzyskania porządanego efektu.

Modele mikroskopowe, w przeciwieństwie do wspomnianych wyżej modeli makroskopowych, biorą one pod uwagę zachowanie konkretnej jednostki. Badane są interakcje pomiędzy pieszymi oraz ich iteracje z przeszkodami oraz otaczającą rzeczywistością. Modele te pozwalają na uzyskanie efekty bardziej odpowiadającego realnemu zachowaniu tłumu. Jednakże wraz ze wzrostem odwzorowania detali wzrasta również złożoność systemu oraz zwiększa się złożoność obliczeń co skutkuje teoretycznie gorszą wydajnością, jednak przy dostępnej obecnie mocy obliczeniowej nawet standardowych komputerów nie gra to aż takiej roli.

### 3.1.2. Modele ciągłe i dyskretne

W modelach mikroskopowych możemy wyodrębnić dwie podgrupy: modele ciągłe oraz dyskretne. Modele dyskretne cechują się zmianą parametrów stanu w konkretnych interwałach czasowych, przyjmują określone wartości dla określonych argumentów i tylko dla nich. W modelach ciągłych stan ulega zmianie przez cały czas działania, może przyjmować dowolną wartość z całego przedziału. Modele ciągłe reprezentują oczywiście dane w sposób bardziej realistyczny, jednakże zwiększają czas obliczeń

Jednym z przykładów na model dyskretny może być automat komórkowy. Uniwersalność automatów komórkowych *Cellular Automata* spowodowała, iż znajdują zastosowanie także w dziedzinie symulacji ruchu pieszych. Automat komórkowy jest modelem matematycznym, który specyfikuje siatkę komórek, zbiór stanów jakie mogą one przyjmować, oraz reguły

określające stan komórki w chwili  $t + 1$ . Stan danej komórki zależy od stanu komórek z nią sąsiadujących w chwili  $t$ .

Dla stworzenia modeli mikroskopowych używano z początku niehomogenicznych automatów komórkowych. Wraz z rozwojem symulacji na automatach komórkowych można było dostrzec duże zmiany bazowym modelu. Powstające symulacje zaczęły zostać klasyfikowane jako **systemy agentowe**.

Niestety jednorodność tej metody uniemożliwia modelowanie bardziej skomplikowanych procesów [Formalizacja Automatu C<sub>o</sub>].



## 4. Wyznaczenie ścieżki

Wyznaczenie najkrótszych ścieżek w grafie jest jednym z podstawowych problemów w teorii grafów. Algorytmy wyszukiwania ścieżek mają wielorakie zastosowanie począwszy od wyznaczenia najszybszych tras na mapie, przesyłania wiadomości przez sieć routerów czy wyznaczeniu połączeń lotniczych o najmniejszym koszcie. Wynikiem działania algorytmów jest uporządkowany zbiór wierzchołków, które musimy kolejno przejść, aby dotrzeć do wyznaczonego wcześniej celu.

Algorytmów wyszukiwania ścieżek jest bardzo wiele, najważniejsze z nich to:

- Algorytm Dijkstry - jest przykładem algorytmu zachłannego. Jeden z najbardziej rozpowszechnionych algorytmów do przeszukiwania ścieżek. Jego złożoność obliczeniowa rośnie w miarę wzrostu punktów węzłowych.
- A\*
- Algorytm Fleury'ego
- Bellmana-Forda - ma zastosowanie, kiedy niektóre krawędzie w grafie mają ujemne wagi
- Algorytm Floyda-Warshalla -
- Algorytm A\*
- Przeszukiwanie wszerze BFS
- Przeszukiwanie włąb DFS





## 5. Opis modelu Social Force

Model Social Force [1], bezsprzecznie najważniejszym z obecnie dostępnych, jest mikroskopowym modelem ciągłym. Zakłada on, że piesi w ruchu mogą zostać w prosty sposób opisani za pomocą sił. Siły te pochodzą nie tylko z oddziaływań konkretnego pieszego na otoczenie, ale także z otoczenia na danego pieszego. Wartość, zwrot oraz kierunek finalnej siły jest składową wszystkich sił działających na danego pieszego. Dotychczasowe symulacje komputerowe pokazują, że Model Social Force, pomimo swojej prostoty bardzo realistycznie oddaje rzeczywiste zachowanie się tłumu.

Nie bez znaczenia jest także łatwość uzyskania parametrów oraz wartości potrzebnych do symulacji. Wartości takie jak predkość  $\vec{v}_\alpha$  czy położenie  $\vec{r}_\alpha$  danego pieszego  $\alpha$  są łatwe do obliczenia, ale także do skalibrowania z danymi empirycznymi.

Pierwsze symulacje korzystające z modelu SF były skupione głównie na ewakuacjach budynków, w tego typu sytuacjach celem pieszego jest dojście do wyjścia w możliwie najkrótszym czasie. Obecnie istnieje mnogość modyfikacji modelu, które pozwalają na zamodelowanie większej ilości zachowań. Obecne modyfikacje przewidują przykładowo unikanie "spychania" innych uczestników ruchu poprzez pieszych poruszających się z większą prędkością [6].

Wykorzystany w pracy model Social Force bazujący na modelu Helbinga [1] zakłada, że na pieszego działają trzy siły. Desired force  $\vec{f}_i^0$ , siła interakcji pomiędzy pieszymi  $i$  oraz  $j$ ,  $\vec{f}_{ij}$  oraz siła interakcji pomiędzy pieszym  $i$ , a przeszkodami,  $\vec{f}_{iw}$

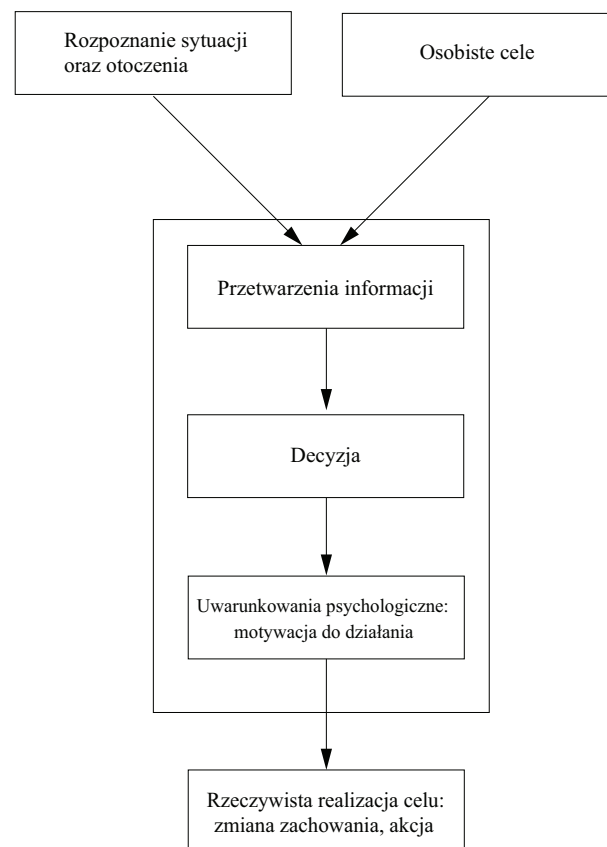
Siła działająca na każdego z pieszych definiuje się jako:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \vec{f}_i^0 + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw} \quad (5.1)$$

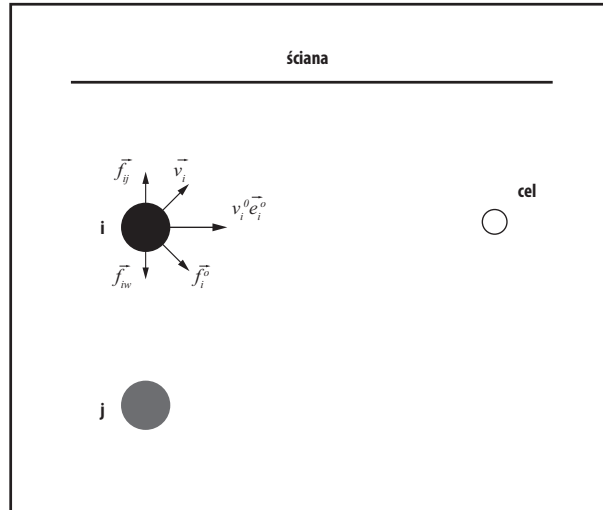
gdzie

$m_i$  – masa pieszego  $i$

$\vec{v}_i(t)$  – aktualna prędkość



**Rys. 5.1.** Schemat podejmowania decyzji przez pieszego, opracowanie własne na bazie [GuideCrowdDynViaModifiedSocialForceModel]



**Rys. 5.2.** Diagram modelu Social Force, opracowanie własne na bazie [GuideCrowdDynViaModifiedSocialForceModel]

## 5.1. Desired force

Bazując na obserwacjach można wywnioskować, że piersi wykazują niechęć do zmiany prędkości oraz kierunku swojej drogi. Zazwyczaj wybierana jest droga, którą można podążać prosto przez jak najdłuższy okres czasu, nawet jeśli drogi alternatywne są takiej samej długości, a droga wybrana przez pieszego jest mocno zatłoczona. Kierunek ruchu obliczany jest na podstawie wzoru:

$$\vec{e}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)\|} \quad (5.2)$$

gdzie

$e_\alpha(t)$  – aktualna pozycja pieszego  $\alpha$  w czasie  $t$

$\vec{r}_\alpha^k$  – najbliższy punkt na ścieżce do celu

W przypadku kiedy ruch pieszego odbywa się bez przeszkód porusza się on w kierunku pozycji celu, z preferowaną przez siebie prędkością,  $\vec{v}_i^0$ . Z powodu działania na pieszego sił z otoczenia obserwuje się dążenie pieszego do osiągnięcia preferowanej przez siebie prędkości w czasie relaksacji  $\tau$ .

$$\vec{f}_i^0 = m_i \frac{v_i^0(t) \vec{e}_i^0 - \vec{v}_i(t)}{\tau} \quad (5.3)$$

gdzie

$\vec{v}_i^0$  – wartość domyślnej prędkości pieszego

$\vec{e}_i^0$  – kierunek ruchu jaki pieszy chce osiągnąć

$\tau$  – czas relaksacji

Jest to tzw. *desired speed*, odzwierciedla ona dążenie danego pieszego  $i$  do osiągnięcia preferowanej prędkości.

Domyślna prędkość pieszego przyjmuje zazwyczaj wartość około  $1.34 \frac{m}{s^2}$  z odchyleniem standardowym  $0.26 \frac{m}{s^2}$  [HeBuAjTw]

## 5.2. Interakcja pomiędzy pieszymi

Naturalnym jest, że kiedy zbliżamy się do innych uczestników ruchu czujemy się niekomfortowo. Piesi, aby uniknąć wypadków utrzymują dystans pomiędzy innymi uczestnikami ruchu oraz przeszkodami. Dystans ten zmniejsza się w przypadku kiedy pieszy śpieszy się oraz kiedy wzrasta gęstość tłumu. Gęstość tłumu zwiększa się w szczególności kiedy piesi znajdują się w okolicy miejsc wywierających zainteresowanie oraz w wąskich przejściach. Siła interakcji pomiędzy pieszymi  $i$  oraz  $j$ ,  $\vec{f}_{ij}$  definiowana jest jako suma dwóch sił, socjologiczno-psychologicznej oraz fizycznej. Piesi mogą także formować grupy, których zachowanie można później sprowadzić do opisu pojedynczego agenta [HeBuAjTw]

$$\vec{f}_{ij} = \vec{f}_{ij}^s + \vec{f}_{ij}^p \quad (5.4)$$

Pierwsza z nich  $\vec{f}_{ij}^s$  związana jest z naturalnym ludzkim odruchem utrzymywania dystansu od drugiego człowieka. Przyjmuje ona wartość maksymalną gdy odległość między dwoma pieszymi  $d_{ij}$  maleje, a wartość mniejszą w przypadku oddalania się pieszych.

Druga z sił  $\vec{f}_{ij}^p$  wywiera nacisk na pieszych kiedy dystans pomiędzy dwoma pieszymi,  $d_{ij}$  jest mniejszy od sumy promieni ich stref prywatnych  $r_{ij} = r_i + r_j$ . Siła ta składa się z "body force",  $\vec{f}_{ij}^{p1}$  oraz "sliding friction force",  $\vec{f}_{ij}^{p2}$ .

$$\vec{f}_{ij} = \vec{f}_{ij}^s + \vec{f}_{ij}^p \quad (5.5)$$

$$\vec{f}_{ij}^s = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] \vec{n}_{ij} \quad (5.6)$$

gdzie

$A_i$  – Moc siły

$B_i$  – Dystans działania siły

$\vec{n}_{ij}$  – wektor jednostkowy o początku w centrum strefy prywatnej pieszego  $i$  a końcu w centrum tej strefy pieszego  $j$

$$\vec{f}_{ij}^p = kg(r_{ij} - d_{ij})\vec{n}_{ij} + (r_{ij} - d_{ij})\delta v_{ij}^t \vec{t}_{ij} \quad (5.7)$$

gdzie

$k$  – - body compression coefficient

$\kappa$  – - Coefficient of sliding friction

$\vec{n}_{ij}$  – - wektor jednostkowy o początku w pozycji pieszego  $i$  a końcu w pozycji pieszego  $j$

$\delta v_{ij}^t * \vec{t}_{ij}$  — zmiana prędkości wzdłuż stycznej do eliptycznego pola strefy prywatnej

$$g(x) = \{0, if x < 0, x if x \geq 0. \quad (5.8)$$



## 6. Charakterystyka ruchu pieszych

### 6.1. Points of interest

Points

### 6.2. Strefa prywatna

Dla każdego pieszego definiuje się opisaną wcześniej strefę prywatną. Im bliżej przeszkody lub innego agenta, tym pieszy czuje się mniej komfortowo i utrzymuje dystans od sąsiada zależny od konkretnej sytuacji. Strefa prywatna pomaga unikać kolizji w przypadkach nagłej zmiany prędkości przez innych uczestników ruchu.

### 6.3. Czas relaksacji

Piesi zmieniając kierunek swojej drogi potrzebują pewien (niewielki) czas na podjęcie decyzji. Z tego względu we wzorze został wprowadzony *czas relaksacji*. Wartość przyjęta w symulacji to  $0.5\text{sek}$

### 6.4. Czekaający piesi

Czekaający piesie są częstymi uczestnikami normalnego ruchu. Często zatrzymujemy się, aby porozmawiać przez telefon, zawiązać sznurowadła czy w oczekiwaniu na przyjazd windy. Czekaający piesi mogą powodować korki [6]. Modelowanie czekających pieszych ma dwa aspekty: reakcje przechodzących obok pieszych na pozostającego w spoczynku oraz pozostającego w spoczynku na poruszających się.

### 6.5. Formowanie strug





## **7. Środowisko testowe**

Symulacja została zaimplementowana przy użyciu



## 8. Testy

Testy symulacji



## **9. Podsumowanie**

### **9.1. Wnioski**

### **9.2. Napotkane problemy**

W trakcie napotkałem

problem z astarem i heaperm problem z brakiem opisuj implementacji



# Bibliografia

- [1] Dirk Helbing i Péter Molnár. „Social force model for pedestrian dynamics”. W: (1995).
- [2] Peng Chen Weiliang Zeng Hideki Nakamura. „A Modified Social Force Model for Pedestrian Behaviour Simulation at Signalized Crosswalks”. W: *Department of Civil Engineering, Nagoya University, Japan* (2014).
- [3] Lei Hou i in. „A social force evacuation model with leadership effect”. W: *Department of Civil Engineering, Nagoya University, Japan* (2014).