

# Przejście tłumu przez wąskie gardło w oparciu o model Social Force.

Irmina Krysiak, Daniel Stefanik, Przemysław Wojtasik

26 listopada 2017

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>3</b>
1.1	Opis problemu/zagadnienia . . . . .	3
1.2	Potencjalne możliwości rozwiązania - analiza wstępna . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Przegląd literatury</b>	<b>4</b>
2.1	Opis teoretyczny . . . . .	4
2.2	Wstępna propozycja kalibracji i walidacji . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Proponowany model</b>	<b>9</b>
3.1	Cele modelu . . . . .	9
3.2	Algorytmy i nawiązanie do opisu literaturowego . . . . .	9
3.3	Poruszanie się pieszych . . . . .	10
3.3.1	Efekt kolizji pieszych . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Symulacja</b>	<b>13</b>
4.1	Technologie . . . . .	13
4.2	Diagram klas . . . . .	13

<b>5</b>	<b>Wyniki symulacji</b>	<b>15</b>
5.1	Zastosowane procedury kalibracji i walidacji . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Wnioski</b>	<b>18</b>
6.1	Najważniejsze wnioski . . . . .	18
6.2	Wyzwania i trudności problemu oraz sukcesy projektu . . . . .	18
6.3	Future Works . . . . .	19

# **1 Wprowadzenie**

## **1.1 Opis problemu/zagadnienia**

Implementacja przejścia tłumu przez wąskie gardło np. bramki. Symulacja będzie wykonana przy pomocy modelu przedstawionego w artykule autorstwa Mehdi Moussaïda, Dirk Helbinga oraz Guy Theraulaza. Zmianę w ciśnieniu będą obrazowały odpowiednie zmiany koloru w wizualizacji pieszych poddanych dużym siłom (odpowiedni wyliczanym). Przetestowane zostanie kilka prostych scenariuszy obejmujących barierki czy kolumnę redukującą siły.

## **1.2 Potencjalne możliwości rozwiązania - analiza wstępna**

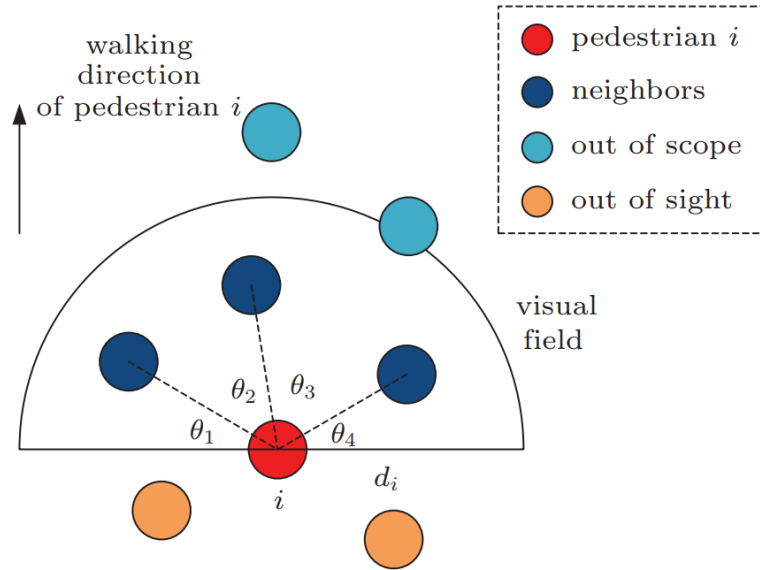
Potencjalnych możliwości rozwiązania problemu przejścia tłumu przez wąskie gardło jest wiele. Szczegółowy opis zagadnienia modelowania ruchu pieszych przedstawiono w kolejnej sekcji wraz z metodami symulowania ruchu.

## 2 Przegląd literatury

### 2.1 Opis teoretyczny

Modelowanie ruchu pieszych znajduje coraz więcej nowatorskich zastosowań w wielu dziedzinach takich jak projektowanie budynków, imprezy masowe, grafika komputerowa, planowanie ruchu robotów [4]. Można rozpatrywać wiele różnych przypadków związanych z poruszaniem się pieszych zarówno w budynkach, jak i na drogach (oznakowanych lub nie). W przeciwieństwie do pieszych poruszających się po oznakowanych ulicach (przejścia, światła), piesi na nieosygnalizowanych drogach [8] nie są ograniczani miejscami wyznaczonymi przez pasy, więc trajektorie ich ruchu są bardziej zróżnicowane, co skutkuje większym wachlarzem możliwości wystąpienia punktów konfliktowych. Piesi podejmują wtedy bardziej złożone decyzje dotyczące zatrzymania/kontynuowania ruchu oraz mechanizmów unikania kolizji, żeby przejść przez ulicę szybko i bezpiecznie.

Model Social Force jest jedną z najpopularniejszych alternatyw do opisywania ruchu pieszych. Doczekał się on wielu różnych modyfikacji i implementacji. Poprzez odwołanie się do fizycznej analogii, jednostki są tutaj traktowane jako punktowe cząstki, na które oddziałują siły odpychania czy przyciągania od innych pieszych czy różnych elementów środowiska [9], podlegają dynamice tłumu. Taki model pośrednio zakłada, że ludzie poruszają się izotropicznie. W rzeczywistości jest jednak przeciwnie. Empiryczne dowody pokazują, że ludzie mają preferowany kierunek ruchu, w którym cały czas podążają. Ruchy boczne są obserwowane tylko w specyficznych sytuacjach, takich jak poszukiwanie drogi w zatłoczonych miejscach albo omijanie niespodziewanych przeszkód [2].



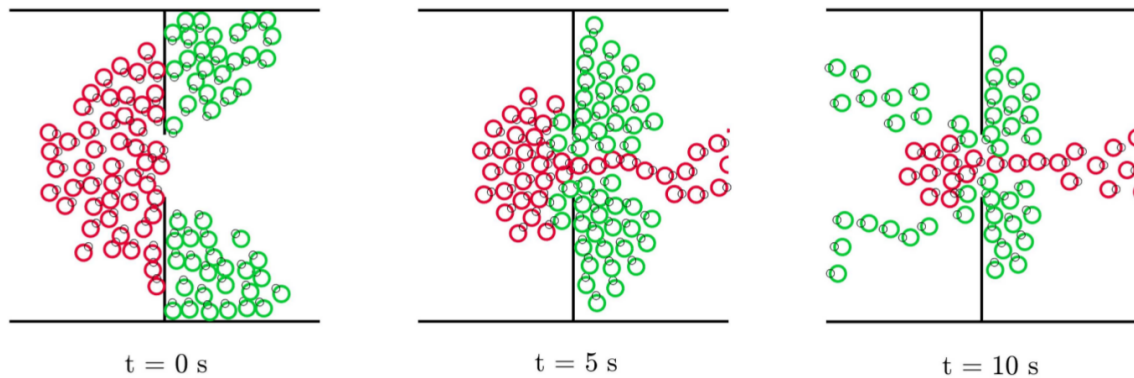
Rysunek 1: Ilustracja sąsiadów pieszego  $i$ . Piesi wokół pieszego  $i$  mogą być zklasyfikowani do jednego z trzech typów: sąsiad, piesi, którzy są poza zakresem sąsiadów oraz piesi za pieszym  $i$ , którzy są poza jego polem widzenia [1].

Model Social Force został przedstawiony przez Helbinga i Molnára [3] ponad dwie dekady temu i od tego czasu jest wciąż badany w literaturze oraz implementowany w programowaniu komercyjnym [5]. Warto zaznaczyć, że model Social Force jest tylko jednym z ogromnej klasy modeli ruchu pieszych bazujących na sile. Pierwsze aplikacje SFM skupiały się głównie na symulacji ewakuacji z budynków. Celem takich aplikacji jest jak najszybsze dojście do wyjścia przez pieszych.

Model Social Force jest modelem ciągłym zakładającym, że indywidualne jednostki są podmiotem fizycznych i socjalnych sił. Model ten może być rozszerzony o różne (nie-trivialne) typy zachowań, takie jak dynamiczny wybór trasy w otwartej przestrzeni [8], pieszych wolących chodzić w grupach lub mających inne preferencje poruszania się [10], wyprzedzanie, czekanie [5], zwalnianie, unikanie kolizji [10] i podążanie za liderem. Jednakże taki typ modelu jest niedostosowany do symulacji komputerowych na dużą skalę, ponieważ złożoność obliczeniowa czas wykonania obliczeń związanych z siłami pomiędzy jednostkami zwiększa się kwadratowo wraz ze wzrostem liczby jednostek [7].

Do zalet tej metodologii należy duża dokładność symulacji oraz precyzja odwzorowania mikroskopowych oddziaływań między pieszymi a środowiskiem. Zasadniczą wadą jest

relatywnie mała wydajność obliczeniowa i trudności z odwzorowaniem niektórych sytuacji. Mimo stałego udoskonalania algorytmów działania tej metody, istotną przeszkodą dla symulacji dużych obiektów są wysokie nakłady obliczeniowe i dlatego metoda ta ma ograniczone możliwości rozwoju [9].



Rysunek 2: Przykładwa symulacja przejścia ludzi w dwóch kierunkach. W tym przypadku jest to symulacja drzwi pociągu. Piesi oznaczenia na próbują wysiąść z pociągu, podczas gdy piesi oznaczeni na zieloną chcą do niego wsiąść [2].

Model social force można łączyć z programowanie agentowym (Agent-based model) oraz automatami komórkowymi (Autómata celular).

Klasyczny przypadek automatu komórkowego, tj. synchroniczny i homogeniczny automat, w zasadzie nie nadaje się do tworzenia symulacji systemów złożonych, a w szczególności do modelowania dynamiki pieszych. Dopiero zastosowanie automatów niehomogenicznych przez uwzględnienie różnych typów komórek (np. przestrzeń ruchu, ściany, przeszkody, drzwi) czy zróżnicowanie funkcji przejścia na siatce automatu, a także asynchronicznych (ustalenie kolejności synchronizacji stanów komórek automatu), pozwala na tworzenie bardziej zaawansowanych symulacji zachowań tłumu. Z praktycznego punktu widzenia można zastosować trzy rodzaje automatów:

- automaty klasyczne (Cellular Automata), w których funkcja przejścia uwzględnia wyłącznie relacje lokalne,
- globalne automaty komórkowe (Global Cellular Automata), w których funkcja przejścia uwzględnia relacje globalne, obejmujące obszar całej siatki,

- „rozszerzone” automaty komórkowe (Extended Cellular Automata), w których funkcja przejścia obejmuje relacje lokalne oraz wybrane komórki z całej siatki. Ciekawą grupą z wyżej wymienionych automatów jest grupa tzw. „rozszerzonych” automatów komórkowych, która umożliwia tworzenie złożonych symulacji, utrzymując przy tym wysoką efektywność prowadzonych obliczeń [9].

Systemy agentowe pozwalają na odwzorowanie bardzo złożonych bardzo złożonych interakcji. Dla modelu Social Force model jednostki ma charakter makroskopowy. Każda osoba reprezentowana jest przez wirtualnego agenta posiadającego indywidualny zestaw zmiennych, które go opisują. Otwarty charakter modelu i możliwość definiowania nowych zachowań pozwala definiować dedykowane zestawy zachowań dla konkretnych scenariuszy. Podstawowe reguły zachowania związane są z odwzorowaniem rzeczywistego sposobu przemieszczania się osób (z uwzględnieniem: omijania przeszkód i innych osób, szukaniem najlepszych dróg, ruchem z zachowaniem określonej prędkości, charakterystyk wzorcowych). Definiowanie własnych zestawów reguł pozwala na symulację osób, które mają różne role w tłumie (np. osoba uciekająca z płonącego budynku, strażak, pojedyncza osoba, rodzice z dziećmi). W modelu wykorzystano własną interpretację zagadnienia stref personalnych, według której w zależności od zagęszczenia zmieniają się całe zestawy zachowań. Zdefiniowane strefy mają charakter ekspercki i mogą być dowolnie zmieniane w celu uzyskania pożądanych charakterystyk bazowych związanych z ruchem [6].

## 2.2 Wstępna propozycja kalibracji i walidacji

W przyjętym rozwiązaniu każdy eksperyment poprzedzony jest procesem kalibracji, który służy do odwzorowania wejściowych charakterystyk wzorcowych. Jest to konieczny etap z uwagi na istotny wpływ danych wejściowych związanych głównie z charakterystykami osób (np: rozmiar, wiek, średnie prędkości przemieszczania się). Z uwagi na niedostępność i trudność pozyskiwania szczegółowych charakterystyk przemieszczania się tłumy można wykorzystać diagramy fundamentalne i porównać z nimi wyznaczoną w procesie kalibracji zależność przepływu od zagęszczenia dla wąskich przejść. [6] Istotnym

elementem modelowania dynamiki pieszych jest przeprowadzenie stosownej walidacji modelu. Walidacja oznacza wielopłaszczyznowe sprawdzenie poprawności i wiarygodności danego modelu. Bierze się wówczas pod uwagę rozmaite współczynniki ilościowe (quantitative) i jakościowe (qualitative), badając zgodność modelu z rzeczywistością. Dobrym przykładem współczynnika jakościowego w dynamice pieszych jest występowanie strug w ruchu dwukierunkowym (piesi idą wtedy za sobą w jednym kierunku). Z kolei przykładem sprawdzanego współczynnika ilościowego jest wykres fundamentalny (czyli relacja gęstości tłumu do przepływu właściwego) [9]



## 3 Proponowany model

### 3.1 Cele modelu

#### Wejścia:

- Piesi:
  - pozycja startowa
  - cel
  - prędkość normalna
  - masa
  - maksymalny kąt widzenia
  - zasięg wzroku
  - czas relaksacji
- Przeszkody
  - umiejscowienie przeszkód

#### Wyjścia:

- wizualizacja przebiegu przechodzenia pieszych
- wizualizacja tworzenia i rozładowywania się tłumu
- ilość kroków przejścia pieszych do celu
- czas przejścia pieszych do celu

### 3.2 Algorytmy i nawiązanie do opisu literaturowego

Wykorzystany przez nas model jest zmodyfikowaną wersją modelu przedstawionego w artykule "How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters" autorstwa: Mehdi Moussaïd, Dirk Helbinga i Guy Theraulaza.

### 3.3 Poruszanie się pieszych

nazwa	zmienna
pieszy	$i$
ściana	$W$
masa	$m_i$ [kg]
promień	$r_i = \frac{m_i}{320}$ [m]
pozycja	$x_i$ (wektor)
prędkość normalna	$v_{0i}$ [ $\frac{m}{s}$ ]
prędkość	$v_i$ (wektor)
punkt docelowy	$O_i$ (wektor)
maksymalny kąt widzenia	$\phi$ [rad]
czas relaksacji	$\tau$ [s]
kierunek	$\alpha \in [-\phi, \phi]$ [rad]
kierunek docelowy	$\alpha_0$ [rad]
zasięg wzroku	$H_i$ [m]
pożądany kierunek	$\alpha_{des}$ [rad]
pożądana prędkość	$v_{des}$ (wektor)
największa widzialna odległość	$d_{max}$ [m]
odległość między pieszym, a przeszkodą w kierunku	$d_h$ [m]
czas	$t$

- Funkcja oceniająca odległość przeszkody od pieszego w zasięgu jego wzroku zależnie od kierunku (jeśli brak przeszkód funkcja zwraca  $d_{max}$ ):

$$f(\alpha)$$

- Sposób obliczania pożądanego kierunku:

$$d_{max} = H_i$$

$$d(\alpha) = d_{max}^2 + f(\alpha)^2 - 2 \cdot d_{max} \cdot f(\alpha) \cdot \cos(\alpha_0 - \alpha)$$

$$\alpha_{des} = \min(d(\alpha))$$

- Prędkość pożądana obliczana jest ze wzoru:

$$v_{des}(t) = \min(v_{0i}, \frac{d_h}{\tau})$$

- Przyspieszenie pieszego:

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{(v_{des} - v_i)}{\tau}$$

### 3.3.1 Efekt kolizji pieszych

nazwa	zmienna
odległość pomiędzy środkami mas pieszych	$d_{ij}$ [m]
odległość pomiędzy środkiem masy pieszego a ścianą	$d_{iW}$ [m]
znormalizowany wektor pomiędzy pieszymi	$n_{ij}$ (wektor)
kierunek prostopadły do ściany	$n_{iW}$ (wektor)
współczynnik skalujący	k (najczęściej $5 \cdot 10^3$ )
siła fluktuacji	(random)

- Jeśli piesi nie dotykają siebie to:

$$g(x) = 0$$

- Jeśli się dotykają to:

$$g(x) = x$$

- Siły kontaktu między pieszymi:

$$f_{ij} = k \cdot g(r_i + r_j - d_{ij}) \cdot n_{ij}$$

gdzie

$n_{ij}$  – znormalizowany wektor od pieszego  $j$  do pieszego  $i$ ,

$d_{ij}$  – odległość między środkami mas pieszych.

- Siły kontaktu między pieszym a ścianą:

$$f_{iW} = k \cdot g(r_i + d_{iW}) \cdot n_{iW}$$

gdzie

$W$  – ściana,

$d_{iW}$  – odległość do ściany,

$n_{iW}$  – kierunek prostopadły do ściany.

- Przyspieszenie ostateczne:

$$\frac{dv_i}{dt} \dot{i} = \frac{(v_{des} - v_i)}{\tau_i} + \sum_{j, j \neq i} \frac{f_{ij}}{m_i} + \sum_W \frac{f_{iW}}{m_i} + \xi$$

## 4 Symulacja

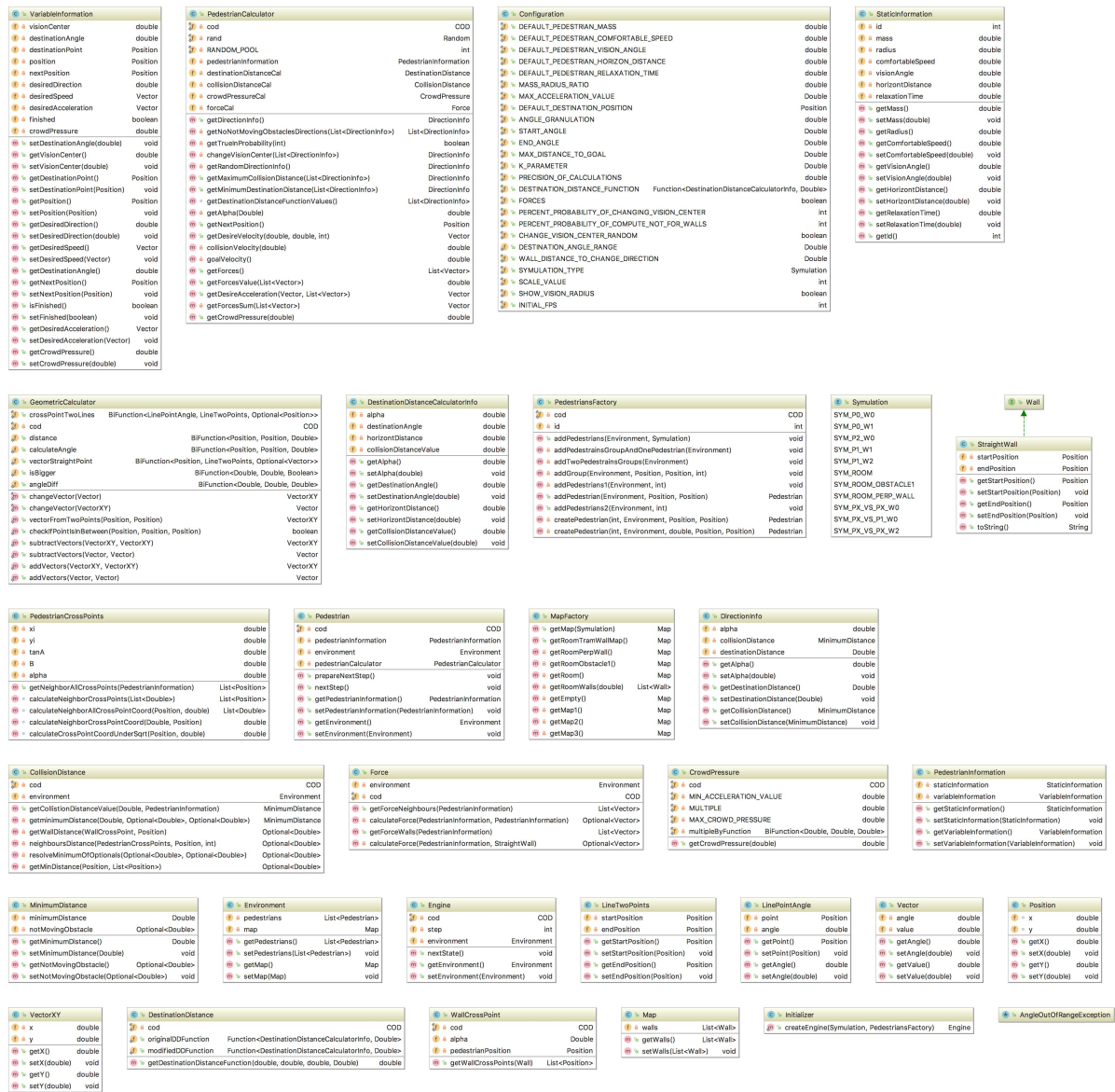
### 4.1 Technologie

W projekcie zostały zastosowane poniższe technologie:

- **Java** - cały model symulacji; została wybrana ze względu na wsparcie programowania obiektowego oraz przejrzystość i względną prostotę implementacji;
- **JavaFX** - interfejs użytkownika; wybrana z uwagi na bogatą bibliotekę komponentów i dobry poziom przedstawiania animacji;
- **JUnit** - testy jednostkowe;

### 4.2 Diagram klas

Ze względu na dużą liczbę zależności między klasami, poniżej przedstawiono uproszczony diagram klas w układzie "Hierarchic Group" projektu symulacji (bez zależności tworzenia między klasami).



Rysunek 3: Diagram klas dla symulacji

## 5 Wyniki symulacji

### 5.1 Zastosowane procedury kalibracji i walidacji

Atrybuty służące do kalibracji modelu:

- Atrybuty klasy *Configuration* pieszy:
  - *double DEFAULT\_PEDESTRIAN\_COMFORTABLE\_SPEED* - Domyślna prędkość normalna pieszego.
  - *double DEFAULT\_PEDESTRIAN\_VISION\_ANGLE* - Domyślny zakres widzenia pieszego.
  - *double DEFAULT\_PEDESTRIAN\_HORIZON\_DISTANCE* - Domyślny zasięg widzenia pieszego.
  - *double DEFAULT\_PEDESTRIAN\_RELAXATION\_TIME* - Domyślny czas relaksacji pieszego.
  - *double DEFAULT\_PEDESTRIAN\_MASS* - Domyślna masa pieszego.
  - *double MASS\_RADIUS\_RATIO* - Stosunek rozmiaru do masy pieszego;
- Atrybuty klasy *Configuration* ogólne:
  - *Function < DestinationDistanceCalculatorInfo, Double >*  
*DESTINATION\_DISTANCE\_FUNCTION* - atrybut wskazujący na funkcję, która jest zastosowana do obliczania wartości odległości dla pieszego.
  - *boolean FORCES* - włącza/wyłącza siły wywierane na pieszym przez przeszkody
  - *Double MAX\_DISTANCE\_TO\_GOAL* - odległość od celu pieszego po której przekroczeniu pieszy znika.
  - *Double K\_PARAMETER* - wzmocnienie siły wywieranej przez przeszkody na pieszego

- *double PRECISION\_OF\_CALCULATIONS* - dokładność obliczeń
- *int PERCENT\_PROBABILITY\_OF\_CHANGING\_VISION\_CENTER*  
- szansa na zmianę kierunku jeśli w zasięgu wzroku pieszego są same przeszkody.
- *boolean CHANGE\_VISION\_CENTER\_RANDOM* - sposób na zmianę kierunku jeśli w zasięgu wzroku pieszego są same przeszkody.
- *int PERCENT\_PROBABILITY\_OF\_COMPUTE\_NOT\_FOR\_WALLS*  
- szansa na ustawienie kierunku na wolny od przeszkód jeśli taki istnieje.
- *Double DESTINATION\_ANGLE\_RANGE* - maksymalny zakres kąta dla którego uznaje się, że jest w kierunku celu.
- *Double WALL\_DISTANCE\_TO\_CHANGE\_DIRECTION* - maksymalna odległość pieszego do ściany w jakiej zmienia on kierunek.

**Po kalibracji oraz walidacji modelu wartości atrybutów przedstawiają się następująco:**

- Atrybuty klasy *Configuration* pieszego:
  - *DEFAULT\_PEDESTRIAN\_COMFORTABLE\_SPEED* = 0.14
  - *DEFAULT\_PEDESTRIAN\_VISION\_ANGLE* = 0.38
  - *DEFAULT\_PEDESTRIAN\_HORIZON\_DISTANCE* = 40
  - *DEFAULT\_PEDESTRIAN\_RELAXATION\_TIME* = 1
  - *DEFAULT\_PEDESTRIAN\_MASS* = 360.0
  - *MASS\_RADIUS\_RATIO* = 320.0
- Atrybuty klasy *Configuration* ogólne:
  - *DESTINATION\_DISTANCE\_FUNCTION* =  
*DestinationDistance.originalDDFunction*  
- funkcja określona w klasie *DestinationDistance*



- $FORCES = true$
- $MAX\_DISTANCE\_TO\_GOAL = 1.8$
- $K\_PARAMETER = 3 * 10^3$
- $PRECISION\_OF\_CALCULATIONS = 0.001$
- $PERCENT\_PROBABILITY\_OF\_CHANGING\_VISION\_CENTER =$   
5
- $CHANGE\_VISION\_CENTER\_RANDOM = true$
- $CERCENT\_PROBABILITY\_OF\_COMPUTE\_NOT\_FOR\_WALLS =$   
5
- $DESTINATION\_ANGLE\_RANGE = 0.2$
- $WALL\_DISTANCE\_TO\_CHANGE\_DIRECTION = 4.0$

## 6 Wnioski

### 6.1 Najważniejsze wnioski

Stworzone przykłady symulacji przejścia tłumu przedstawiają różne sytuacje z którymi możemy spotkać się w życiu codziennym. *SYM\_PX\_VS\_PX\_W2* - przedstawia przejście dwóch grup ludzi przez wąskie przejście. jedna grupa z prawej strony gardła stara się przejść na lewą, a druga na odwrót. Grupy klinują się na dłuższy czas w przejściu. *SYM\_PX\_VS\_PX\_W0* - przedstawia podobną sytuację lecz w tym przypadku nie ma przeszkód, w których klinują się piesi. Grupy nawzajem zatrzymują się ocierając się o siebie. *SYM\_PX\_VS\_P1\_W0* - przedstawia przejście grupy ludzi w prawą stronę i jednego pieszego w lewą stronę. Pojedynczy pieszy przeciska się przez tłum lub omija grupę obok, zależnie od ustawienia pieszych w grupie. *SYM\_ROOM* - pomieszczenie z którego wychodzą piesi przez wąskie przejście. Jeśli pieszych jest dostatecznie dużo - widać duży nacisk pieszych na siebie w okolicach wyjścia - co spowalnia przejście grupy do celu. *SYM\_ROOM\_OBSTACLE1* - wyjście z pomieszczenia jest utrudnione przez przeszkodę. Tłok jest jeszcze większy, a wzajemny nacisk pieszych rośnie. Grupa w pewnych przypadkach całkowicie blokuje się na pewien czas. Symulacja oferuje także budowanie swoich przypadków przejścia tłumu.

### 6.2 Wyzwania i trudności problemu oraz sukcesy projektu

- obliczanie funkcji odległości dla pieszego
- obliczanie sił wywieranych na pieszych oraz końcowej prędkości pieszego
- optymalizacja kodu
- walidacja i kalibracja symulacji

## 6.3 Future Works

- Ustawianie wszystkich parametrów w interfejsie użytkownika
- Ulepszenie algorytmu znajdowania kierunku prowadzącego do celu
- Optymalizacja algorytmów

## Literatura

- [1] Mohcine Chraïbi, Andreas Schadschneider, and Armin Seyfried. *Modeling, Simulation and Visual Analysis of Crowds*. Springer-Verlag New York, 2013.
- [2] Francesco Farina, Daniele Fontanelli, Andrea Garulli, Antonio Giannitrapani, and Domenico Prattichizzo. Walking ahead: The headed social force model. *PLoS ONE* 12(1): e0169734. doi:10.1371/journal.pone.0169734, (?):1–23, 2017.
- [3] Dirk Helbing and Péter Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review*, (51):4282–4286, 1995.
- [4] Shaonian Huang, Dongjun Huang, and Mansoor Ahmed Khuhro. Crowd motion analysis based on social force graph with streak flow attribute. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, (492051):1–13, 2015.
- [5] Fredrik Johansson, Anders Peterson, and Andreas Tapani. Waiting pedestrians in the social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, (419):95–107, 2015.
- [6] Michał Kapałka. Simulation of crowd behavior in dynamic environment. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, (2):79–88, 2015.
- [7] Baocheng Ni, Zhen Li, Pei Zhang, and Xiang Li. An evacuation model for passenger ships that includes the influence of obstacles in cabins. *Mathematical Problems in Engineering*, (5907876):1–23, 2017.
- [8] Cao Ningbo, Wei Wei, Qu Zhaowei, Zhao Liying, and Bai Qiaowen. Simulation of pedestrian crossing behaviors at unmarked roadways based on social force model. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, (8741534):1–17, 2017.
- [9] Jarosław Wąs. Modelowanie dynamiki tłumu. *Pomiary Automatyka Robotyka*, (12):217–219, 2011.

- [10] Zhilu Yuan, Hongfei Jia, Linfeng Zhang, and Lei Bian. Simulation of pedestrian behavior in the collision-avoidance process considering their moving preferences. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, (3678268):1–13, 2017.