



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 osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Spis treści

1. Wprowadzenie	7
1.1. Cele pracy	8
1.2. Zawartość pracy	8
1.3. Zastosowanie symulacji komputerowych	9
1.4. Problemy związane z symulacjami komputerowymi	9
2. Wykaz ważniejszych oznaczeń	11
3. Wprowadzenie teoretyczne	13
3.1. Klasyfikacja modeli symulacji ruchu pieszych	13
3.1.1. Modele mikroskopowe oraz makroskopowe	13
3.1.2. Modele ciągłe i dyskretne	14
4. Wyznaczenie ścieżki	17
5. Opis modelu Social Force	19
5.1. Desired force	21
5.2. Interakcja pomiędzy pieszymi	22
5.3. Zalety oraz wady Modelu Social Force	23
6. Charakterystyka ruchu pieszych	25
6.1. Points of interest	25
6.2. Strefa prywatna	25
6.3. Czas relaksacji	25
6.4. Czekający piesi	25
6.5. Formowanie strug	26
6.6. Unikanie Kolizji	26
6.6.1. Kolizja czołowa	26
6.6.2. Kolizja boczna	26
6.6.3. Kolizja tylna	27

7. Schematy działania systemu.....	29
8. Testy.....	31
9. Podsumowanie.....	33
9.1. Wnioski.....	33
9.2. Napotkane problemy	33
9.3. Kierunki dalszych prac	33

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 wciąż utrzymującym zagrożeniami terrorystycznymi [1] tworzenie symulacji 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)[2] czy wybuch paniki na Love Parade w Duisburgu w roku 2010 (21 ofiar)[3] 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 filmografię kończąc na badaniu skutków katastrof. Dzięki symulowaniu 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.

Podróżę piesze są bardzo częstym sposobem przemieszczania się w przestrzeni miejskiej. Odległość jest podstawowym czynnikiem wpływającym na wybór podróży. Na przejściach dla pieszych w Japonii ginie 30% osób uczestniczących w wypadkach drogowych [5], a w Niemczech odsetek ten wynosi 15% [German institute for econeomic research 2010]. W Polsce odsetek ofiar śmiertelnych w ruchu drogowym wśród pieszych wynosi 34% [4]. Zgodnie z danymi organizacji Fire Administration w Stanach Zjednoczonych w roku 2007 3430 osób zmarło w pożarach oraz blisko 18 tysięcy zostało rannych [6]. 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. Ostatnie lata przyniosły wiele zmian w dziecinie modelowania dynamiki tłumu. Wraz z nowatorskimi pracami Helbinga[7] większą popularność zyskały

modele mikroskopowe takie jak Model Social Force, które wyparły dotychczas stosowane modele makroskopowe bazujące na zasadach hydrodynamiki [7]. Modelowanie ruchu pieszych odgrywa dużą rolę w projektowaniu, dostarcza wielu informacji użytecznych podczas planowania miejsc użyteczności publicznej. Znajomość problemów mogących wystąpić podczas ewakuacji oraz 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 zbadać jak na ewakuację wpłynie rosnąca gęstość tłumu.

1.1. Cele pracy

Głównym celem pracy jest implementacja oraz przeprowadzenie symulacji zachowania pieszych z użyciem metody Social Force. Symulacja ruchu pieszych skupia się na dużych skupiskach ludzi w małych przestrzeniach. Zaproponowany model pozwala na opisanie każdej osoby z osobną 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: przedstawiono podstawowe informacje dotyczące symulacji komputerowych z ruchem pieszych.

Rozdział 3: nakreślone zostają teoretyczne aspekty symulacji oraz porównania istniejących rozwiązań pomagających takie symulacje zaimplementować.

Rozdział ??: opisany zostaje sposób wyznaczenia najkrótszej ścieżki jaką podąża pieszy.

Rozdział 5: opis modelu Social Force używanego w pracy.

Rozdział 6: opisane zostają zjawiska towarzyszące ruchowi pieszych

Rozdział 7: Schemat działania

Rozdział 8: Testy aplikacji

Rozdział 9: Podsumowanie wykonanej pracy

1.3. Zastosowanie symulacji komputerowych

Symulacje komputerowe w dzisiejszych czasach mają bardzo szerokie zastosowanie. Pozwalają w szczególności przeanalizować procesy, wymagające w rzeczywistości bardzo dużo czasu lub takie, które ciężko jest przeanalizować (np. ewakuacje budynków). Ich zastosowanie pozwala na uniknięcie trudnych do przewidzenia błędów. Dzięki swoim możliwościom, znalazły one zastosowanie w dziedzinach takich jak:

- Symulacje statków powietrznych (np. do szkolenia przyszłych pilotów),
- ekonomia i biznes (systemy kolejkowe, zarządzanie zapasami),
- nauki społeczne (dynamika populacji, prognozowanie podziału miejsc w parlamencie),
- nauki inżynierskie i przyrodnicze (meteorologia, wytrzymałość konstrukcji),
- komputerowe gry symulacyjne,
- kryminalistyka (np. rekonstrukcja biegu wydarzeń wypadków).

1.4. Problemy związane z symulacjami komputerowymi

Głównym problemem związanym z symulacjami jest ich złożoność. Na modelowane procesy wpływa bardzo wiele czynników, które należy zaimplementować. Wprowadza to nie tylko złożoność problemu na poziomie koncepcyjnym oraz wydajnościowym, ale także implementacyjnym. Po zamodelowaniu danego procesu podejmuje się zazwyczaj kroki w celu weryfikacji modelu, aby w możliwie największym stopniu odpowiadał rzeczywistości.

2. Wykaz ważniejszych oznaczeń

SFM - Social Force Model

3. Wprowadzenie teoretyczne

Dziedziny nauki badające ruch pieszych to nie tylko informatyka. Na powstanie modeli mają także wpływ prace uczonych z takich dziedzin jak psychologia, socjologia czy architektura. Problem zachowania tłumu jest skomplikowany i dopiero połączenie tych wszystkich dziedzin daje 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 skupiskach ludzi. Człowiek ma tendencję do podejmowania decyzji na bazie, 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 na sytuacji drogowe reaguje 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 obecnie dostępne 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 makroskopowe

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 oraz modele kolejkowe [8], które zostają odpowiednio dostosowane do potrzeb symulacji. Przykładem może być hydrodynamiczny model Paulusa opierający się na równaniach przepływu [9]. Modele te nie biorą pod uwagę indywidualnych zachowań jednostki.

Podejście makroskopowe 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 pożądanego efektu. Modele mikroskopowe, w przeciwieństwie do wspomnianych wyżej modeli makroskopowych, biorą one pod uwagę zachowanie konkretnej jednostki. Badane są interakcje pomiędzy pieszymi, ich iteracje z przeszkodami oraz otaczającą rzeczywistością. Modele te pozwalają na uzyskanie efektu 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 dyskretne oraz ciągłe. 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 modelu dyskretnego może być automat komórkowy. Uniwersalność automatów komórkowych (*Cellular Automata*) spowodowała, że znajdują one zastosowanie także w dziedzinie symulacji. 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 zależny jest od stanu komórek z nią sąsiadujących w chwili t . Możemy [rodzaje aurtomatow] Dla stworzenia modeli mikroskopowych używa się niehomogenicznych automatów komórkowych [**modelowanieDynamikiTłumu**]. Zastosowane w nich różne typy komórek oraz zróżnicowanie funkcji przejścia na siatce pozwalają na różnicowanie zachowań poszczególnych jednostek, Wraz z rozwojem symulacji na automatach komórkowych można było dostrzec duże zmiany w bazowym modelu. Powstające symulacje zaczęły być klasyfikowane jako **systemy agentowe**.

Niestety jednorodność tej metody uniemożliwia modelowanie bardziej skomplikowanych procesów [Formalizacja Automatu C {\'o}w].

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 najkrótszych tras na mapie, poprzez przesyłanie wiadomości przez sieć routerów, kończąc na wyznaczaniu połączeń lotniczych o najmniejszym koszcie. Wynikiem działania algorytmów wyznaczania ścieżek, jest uporządkowany zbiór wierzchołków, którymi należy kolejno podążać, aby dotrzeć do wyznaczonego wcześniej celu.

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

- Algorytm Dijkstry - przykład algorytmu zachłannego. Jeden z najbardziej rozpowszechnionych algorytmów w dziedzinie przeszukiwania ścieżek. Jego złożoność obliczeniowa rośnie w miarę wzrostu punktów węzłowych,
- Algorytm A* - algorytm wykorzystany w pracy. Jest to rozszerzona wersja algorytmu Dijkstry. Dzięki zastosowaniu heurystyki skraca się czas obliczeń,
- Algorytm Bellmana-Forda - ma zastosowanie, kiedy niektóre krawędzie w grafie mają ujemne wagi
- Algorytm Floyda-Warshalla - pozwala na odnalezienie najkrótszych ścieżek pomiędzy wszystkimi parami wierzchołków w grafie,
- Przeszukiwanie wszerz BFS - najprostszy z algorytmów, nie uwzględnia wag ścieżek,
- Przeszukiwanie włąb DFS

Spośród wymienionych algorytmów implementacji symulacji został użyty algorytm A*. Gwarantuje on zawsze znalezienie optymalnej ścieżki jeśli tylko istnieje. Nie jest on też zbyt złożony obliczeniowo

5. Opis modelu Social Force

Model Social Force [7], bezsprzecznie najważniejszy 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 siły finalnej jest składową wszystkich sił działających na danego pieszego. Piesi w modelu reprezentowani są za pomocą cząstek, które dążą do celu w konkretnych kierunkach oraz są pod działaniem wspomnianych sił. Dotychczasowe symulacje komputerowe pokazują, że Model Social Force, pomimo swojej prostoty bardzo realistycznie oddaje rzeczywiste zachowanie tłumu.

Nie bez znaczenia jest także łatwość uzyskania parametrów oraz wartości potrzebnych do symulacji. Wartości takie jak predkość \vec{v}_α czy położenie \vec{r}_α danego pieszego α 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 wariantów modelu, które pozwalają na zamodelowanie większej ilości zachowań. Obecne modyfikacje przewidują przykładowo unikanie "spychania" innych uczestników ruchu poprzez pieszych poruszających się z większą prędkością [11].

Istnieje bardzo wiele różnych modyfikacji modelu Social Force. Wykorzystany w pracy model [10] bazuje na oryginalnym modelu Helbinga [7] 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}

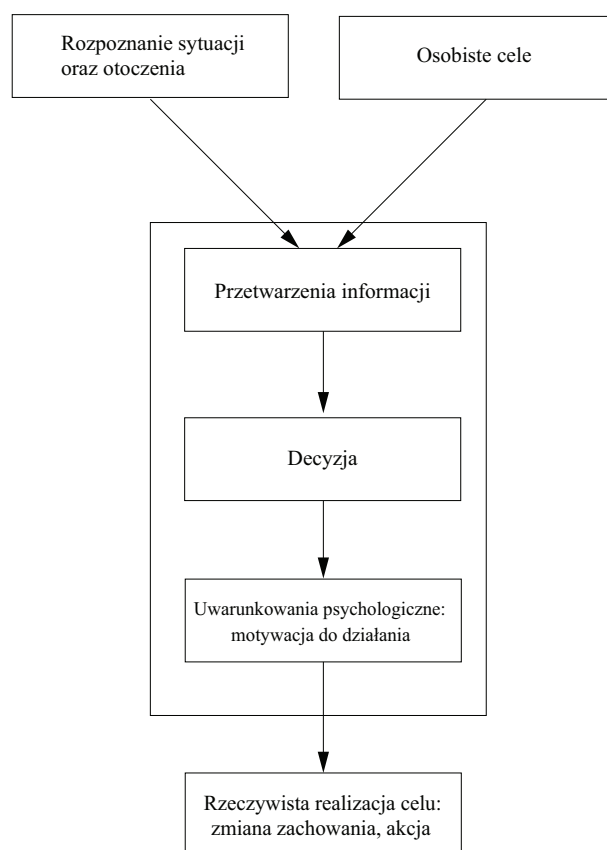
Siła działająca na każdego z pieszych definiuje się jako:

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

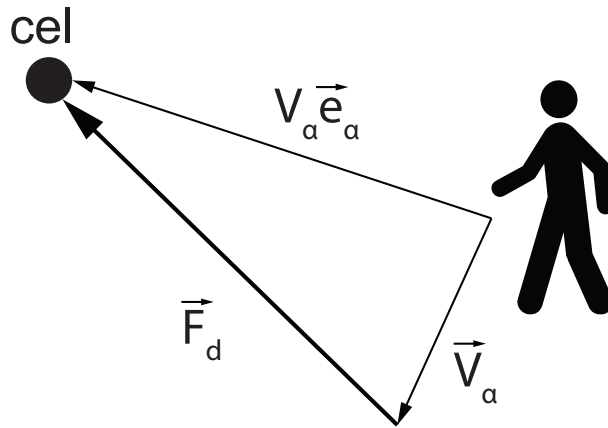
gdzie

m_i – masa pieszego i

$\vec{v}_i(t)$ – aktualna prędkość



Rys. 5.1. Schemat podejmowania decyzji przez pieszego, opracowanie własne na bazie [10]



Rys. 5.2. Schemat siły *desired force*, opracowanie własne na bazie [5]

5.1. Desired force

Bazując na obserwacjach można wywnioskować, że piesi 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 α w czasie t

\vec{r}_α^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 τ .

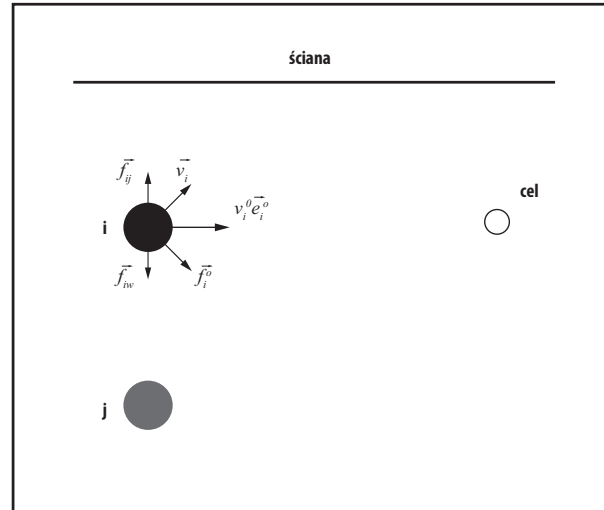
$$\vec{f}_i^0 = m_i \frac{v_i^0(t) \vec{e}_i^0 - \vec{v}_i(t)}{\tau} \quad (5.3)$$

gdzie

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

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

τ – czas relaksacji



Rys. 5.3. Diagram modelu Social Force, opracowanie własne na bazie [10]

Jest to tzw. *desired speed* [wyjaśnić], 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 $0.26 \frac{m}{s^2}$ [12]

5.2. Interakcja pomiędzy pieszymi

Naturalnym jest, że kiedy zbliżamy się do innych uczestników ruchu czujemy się niekomfortowo. Zakłada się, że każdy z pieszych, który jest w konflikcie z innym uczestnikiem ruchu generuje wokół siebie eliptyczne pole siły, które działa na drugiego z pieszych. 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 [12]

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

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.

$$\vec{f}_{ij}^s = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] \vec{n}_{ij} \quad (5.5)$$

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

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} .

$$\vec{f}_{ij}^p = kg(r_{ij} - d_{ij})\vec{n}_{ij} + (r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ij}^t \vec{t}_{ij} \quad (5.6)$$

gdzie

k – body compression coefficient

κ – 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

–

$$g(x) = \{0, if x < 0, x if x \geq 0. \quad (5.7)$$

Warto zaznaczyć, że druga z sił przyjmuje pewne wartości nawet w przypadku kiedy dwoje pieszych znajduje się daleko od siebie. Oznacza to, że piesi zawsze starają się utrzymać dystans od siebie nawzajem [8].

5.3. Zalety oraz wady Modelu Social Force

Największą z zalet opisywanego modelu jest precyzja odwzorowania zachowań mikroskopowych oddziaływań pomiędzy pieszymi oraz otaczającą ich rzeczywistością. SFM pokazuje także wiele znanych zachowań takich jak:

- Unikanie kontaktu z przeszkodami oraz innymi uczestnikami ruchu przed dojściem do kolizji,

- *Szybciej znaczy wolniej*, im szybciej pieszy próbuje się poruszać tym bardziej zatłoczone stają się miejsca takie jak obszary wyjścia z budynków co skutkuje spowolnieniem ruchu,
- formowanie strug, w korytarzach piesi próbują poruszać się w liniach. Zachowanie to może być zauważone w szczególności kiedy dwie grupy ludzi poruszają się w przeciwnych kierunkach.

Wśród wielu zalet modelu możemy wskazać także wady. Pierwszą z nich jest mała wydajność obliczeniowa oraz trudności z odwzorowaniem niektórych sytuacji. Mnogość sił, które są obliczane w przemnożeniu poprzez ilość pieszych powoduje wysoki narzut na ilość obliczeń. W tym miejscu dużą konkurencją stają się automaty komórkowe, które nie wymagają tak skomplikowanych obliczeń dając jednocześnie szerokie spektrum odwzorowania zróżnicowanych zachowań ruchu pieszych.

6. Charakterystyka ruchu pieszych

6.1. Points of interest

Points

6.2. Strefa prywatna

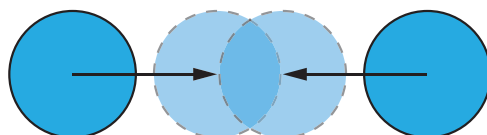
Dla każdego pieszego definiuje się opisaną wcześniej strefę prywatną. Im bliżej przeszkody lub innego agenta, tym pieszy czuje się mniej komfortowo i utrzymuje dystans od sąsiada zależny od konkretnej sytuacji. Strefa prywatna pomaga unikać kolizji w przypadkach nagłej zmiany prędkości przez innych uczestników 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 0.5sek

6.4. Czekaający piesi

Czekaający piesze 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 [11]. Modelowanie czekających pieszych ma dwa aspekty: reakcje przechodzących obok pieszych na pozostającego w spoczynku oraz pozostającego w spoczynku na poruszających się.



Rys. 6.1. Schemat kolizji czołowej, opracowanie własne

6.5. Formowanie strug

6.6. Unikanie Kolizji

Podczas każdej zmiany położenia podczas symulacji należy sprawdzić czy po przejściu nie dojdzie do kolizji z innymi uczestnikami ruchu czy przeszkodami. Jeśli dojdzie do kolizji należy sprawdzić jakiego jest ona typu i dostosować do niej zachowanie. Do kolizji może dojść w przypadku kiedy dwoje pieszych w następnym kroku mają przejść na to samo miejsce lub kiedy zamieniają się miejscami. Każda z kolizji wymaga podjęcia innych kroków, aby jej uniknąć. Po uniknięciu kolizji pieszy powinien powrócić do swojej pierwotnej ścieżki ruchu. Każdy z pieszych ma także pewien priorytet zależny od tego czy niepełnosprawny itp

Zgodnie z pracą [13] możemy wyróżnić trzy typy kolizji:

6.6.1. Kolizja czołowa

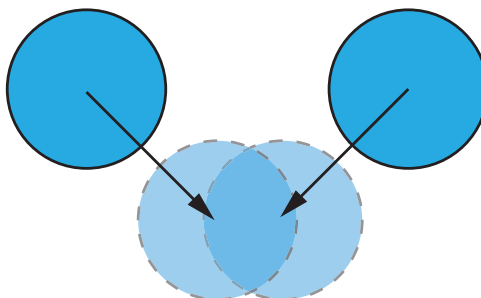
Występuje w przypadku kiedy dwoje pieszych idą prosto na siebie. Na samym początku należy określić czy piesi kolidują ze sobą po lewej czy po prawej stronie (rzadko zdarza się ruch dokładnie na wprost siebie). Piesi preferują takie uniknięcie kolizji, jakie pozwoli im na jak najmniejsze odchylenie od ich, wyznaczonej wcześniej, trasy. Na bazie obserwacji możemy wyróżnić trzy możliwości uniknięcia takiej kolizji:

- zmianę kierunku ruchu
- zmianę prędkości
- zmianę zarówno kierunku jak i prędkości

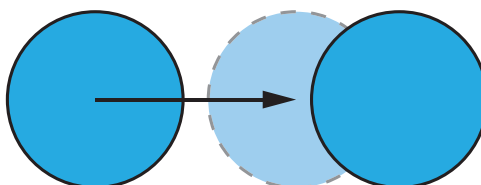
Jeśli żadne z tych nie zadziała to pieszy zwyczajnie się zatrzyma. Pozwoli to na przejście innego pieszego, który ominie tego co stoi a ten co stoi pójdzie sobie potem dalej.

6.6.2. Kolizja boczna

Kolizja, której rozwiązanie jest podobne jak dla *kolizji czołowej*.



Rys. 6.2. Schemat kolizji czołowej, opracowanie własne



Rys. 6.3. Schemat kolizji czołowej, opracowanie własne

6.6.3. Kolizja tylna

Ma miejsce kiedy jeden z kolidujących pieszych jest ze innym pieszym, ale ma wyższą prędkość ruchu, więc jaskoczy na niego. W tym przypadku są dwie drogi rozwiązania

- zwolnić do takiej samej prędkości jak pieszy z przodu i iść za nim
- przyspieszyć i wyprzedzić kolidującego pieszego z którejś ze stron

7. Schematy działania systemu

Symulacja została zaimplementowana przy użyciu języka Java we wsparciu biblioteki graficznej Jwgl

8. Testy

Testy symulacji

9. Podsumowanie

9.1. Wnioski

9.2. Napotkane problemy

Istnieje wiele publikacji dotyczących tematyki ruchu pieszych. Jednakże, większość z publikacji nie porusza całości problemu. Zazwyczaj opis dotyczy części problemu postawionego w niniejszej pracy. Ciężko jest doszukać się kompleksowego wytłumaczenia wszystkich zjawisk takich jak formowanie strug czy unikanie kolizji w obrębie jednego zaproponowanego modelu.

W trakcie tworzenia pracy autor napotkał następujące problemy:

- wydajność algorytmu A* do wyznaczania optymalnych ścieżek przejścia. Implementacja samego algorytmu nie należy do najbardziej skomplikowanych. Ścieżki zostały łatwo wyznaczone, jednakże problem pojawił się przy testach dla większej ilości agentów. Poprzez reprezentację tablicową dwóch zbiorów *open set* oraz *close set* potrzebnych do działania algorytmu czas wyszukiwania ścieżki na mapie z ilością węzłów około 480000 wynosił około 10 sekund. Jest to czas wysoce odbiegający od potrzeb symulacji. Poprzez reprezentację zbiorów jako stos czas ten skrócił się do około 100-200 ms dla takiej samej ilości węzłów. Czas wyszukiwania zależy w szczególności od ilości punktów węzłowych, ale także od odległości punktu początkowego od końcowego oraz ilości przeszkód.
- w praktyce wszystkie publikacje poruszające temat symulacji skupiają się w dużej mierze na opisie modelu, nie dotykają tematyki samej symulacji. Jednym z największych problemów było zastosowanie wybranego modelu do symulacji.

9.3. Kierunki dalszych prac

Temat symulacji ruchu pieszych jest bardzo rozległy.

Bibliografia

- [1] Europol Union Agency for Law Enforcement Cooperation. „Terrorism Situation and Trends Raport”. W: (2017).
- [2] *Hillsborough disaster*. 2017. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hillsborough_disaster.
- [3] *Love Parade disaster*. 2017. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Love_Parade_disaster.
- [4] Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego. „Metodologia systematycznych badań zachowań pieszych i relacji pieszykierowca wraz z przeprowadzeniem badań pilotażowych”. W: (2015).
- [5] 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).
- [6] Lei Hou i in. „A social force evacuation model with leadership effect”. W: *Department of Civil Engineering, Nagoya University, Japan* (2014).
- [7] Dirk Helbing i Péter Molnár. „Social force model for pedestrian dynamics”. W: (1995).
- [8] Yuan Gao i in. „A modified social force model considering relative velocity of pedestrians”. W: (2013).
- [9] Jarosław Wąs Konrad Kułakowski. „Architektura systemu modelowania dynamiki pieszych”. W: (2009).
- [10] Xiaoxia Yang i in. „Guided crowd dynamics via modified social force model”. W: (2014).
- [11] Andreas Tapani Fredrik Johansson Anders Peterson. „Waiting Pedestrians in Social Force Model”. W: (2015).
- [12] Johansson A Werner T Helbing D. Buzna L. „Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions”. W: *Transportation Science* (2005).
- [13] Charif Foudil, Cédric Sanza i Yves Duthen. „Path Finding and Collision Avoidance in Crowd Simulation”. W: (2009).