

Modelowanie zachowań stad zwierząt

W ramach projektu należy opracować algorytm modelowania zachowania stad zwierząt. Warto rozpocząć od wykorzystania Algorytmu Stada. Zbadać wpływ takich czynników jak pojawienie drapieżnika, pożywienia, istnienie lidera lub jego brak na modyfikacje zachowań stada i poszczególnych osobników.

Dużym plusem byłaby również próba opracowania wskaźników mogących służyć do walidacji modelu.

Wprowadzenie do tematu

Opis problemu/zagadnienia

Zachowania stadne to jedne z najbardziej tajemniczych zjawisk natury. Ławice ryb czy klucze ptaków sprawiają wrażenie jakby były jednym organizmem, mimo, że składają się z zupełnie odrębnych i często niekomunikujących się bezpośrednio ze sobą osobników. Jest to struktura samoorganizująca się, rosnąca i zmieniająca, często bez kierownictwa lidera. Ludzie wszystkich epok historycznych obserwowali to zjawisko zastanawiając się nad jego przyczynami.

"...and the thousands of fishes moved as a huge beast, piercing the water. They appeared united, inexorably bound to a common fate. How comes this unity?"

Anonim, 17 wiek

Powody formowania się stad, ławic, watach i kluczy były od dawna i wciąż są obiektem poważnych badań i źródłem informacji wykorzystywanych w wielu dziedzinach. Tworzą się z pomocą naturalnego instynktu popartego korzyściami dla każdego z członków stada. Często wymieniane i dobrze zdefiniowane korzyści to:

- Wspólne wychowanie potomstwa;
- Ostrzeganie o niebezpieczeństwie;
- Efektywniejsze poszukiwanie pożywienia;
- Zmniejszenie szansy ataku drapieżnika na jednostkę;
- Umożliwienie odparcia ataku drapieżnika;
- Sprawniejsze poruszanie się w grupie;

Pola zastosowania symulacji

Pierwszym polem, gdzie pojawiła się potrzeba zastosowania symulacji zachowania stada zwierząt była **grafika i animacja komputerowa**. Twórcy animacji chcieli pokazać skomplikowane zjawiska natury w swoich pracach. Początkowo ręcznie kluczowano pozycje poszczególnych osobników, co przy większym niż kilkadziesiąt osobników stadzie stawało się, co najmniej uciążliwe.

Już po wymyśleniu podstawowego modelu symulacyjnego pojawiły się nowe pola zastosowania. Pomysłodawca Algorytmu Stada sugeruje w [1] wykorzystanie go do **prowadzenia naukowych badań i statystyk** ilościowych na modelu, zamiast trudnych do zrealizowania obserwacji na dużym obszarze z natury płochliwych gatunków zwierząt.

Największym motorem napędzającym rozwój i optymalizację symulacji zachowań stadnych są **gry komputerowe**. Dzięki zastosowaniu symulacji obiekty w grze zachowują się mniej przewidywalnie, podejmując za każdym razem trochę inne akcje. Odpowiednio dopasowane zachowania są wykorzystywane przez obiekty będące tłem (np. ptaki na niebie), przeciwników w grach typu FPS, a nawet przez komputerowo sterowanych kierowców ścigających się z graczem na torach symulatorów jazdy.

Potencjalne możliwości rozwiązania – analiza wstępna

Pierwszą próbę symulacji zachowania stada (tu ptaków) zaprezentowano na konferencji SIGGraph'85. Zespół z Uniwersytetu Ohio zaprezentował postępy prac nad animacją o tytule "Eurythmy" [2]. Ukończona animacja ujrzała światło dzienne dopiero w 1989r. Nie wydano żadnego dokumentu opisującego sposób symulacji zachowania stada, lecz Craig Reynolds w [1] pisze o osobistej korespondencji z wykonawcami projektu, z której wynika, że użyli oni modelu opartego na polu siłowym wokół każdego ptaka odpychającym je od siebie w celu uniknięcia kolizji. Oprócz tego prawdopodobnie wprowadzono pewien stopień losowości, co jednak nie spowodowało znacznej poprawy realizmu animacji.

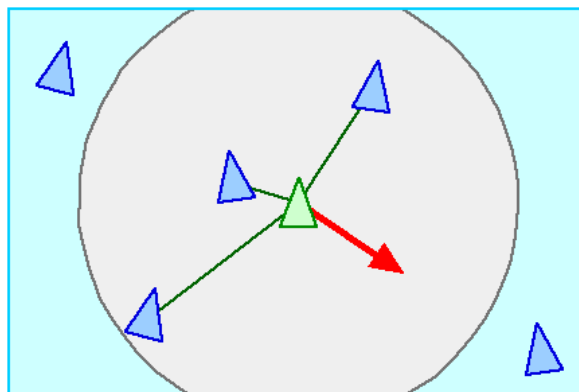
Algorytm Stada

Pierwsze rozwiązanie wykorzystujące symulację opartą na „modelu behawioralnym” i "aktorach" zostało zaproponowane w 1986r. roku przez Craiga Reynoldsa podczas konferencji SIGGraph'86. Rok później na tym samym spotkaniu zaprezentował działanie algorytmu w animacji „Stanley and Stella in: Breaking the Ice”. Opublikował też dokument opisujący zastosowane rozwiązania [1]. Każdy osobnik miał być osobnym obiektem posiadającym własną reprezentację otoczenia i postępującym wg kilku prostych zasad. Takie podejście było naturalne ze względu na strukturę stada, sugerowane w kilku pracach, lecz Reynolds, jako pierwszy zdefiniował i zaimplementował konkretne reguły umożliwiające grupie agentów realistyczne zbiorowe zachowania przypominające ławice ryb, roje pszczoł albo stada ptaków.

Zasady proponowane przez Reynoldsa

Trzy zasady opierają się na wektorach siły działających między **sąsiadującymi** osobnikami. Osobniki poza lokalnym otoczeniem nie mają bezpośredniego wpływu na zachowanie. (Ruchy występujące w oddalonych obszarach stada propagują się z opóźnieniem poprzez lokalne sąsiedztwo). O sąsiedztwie w podstawowej formie decyduje dystans między osobnikami i kąt widzenia.

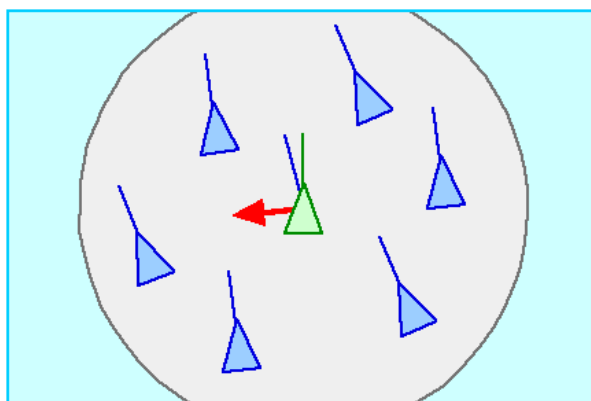
Rozdzielność – sterowanie zapobiegające tworzeniu tłumu w jednym miejscu. Polega na odpychaniu osobników od siebie nawzajem. Wypadkowa siła jest obliczana, jako złożenie przeskalowanych zgodnie z odwrotnością odległości wektorów odpychania od poszczególnych sąsiadów.



Rysunek 1: Rozdzielność, źródło: [3]

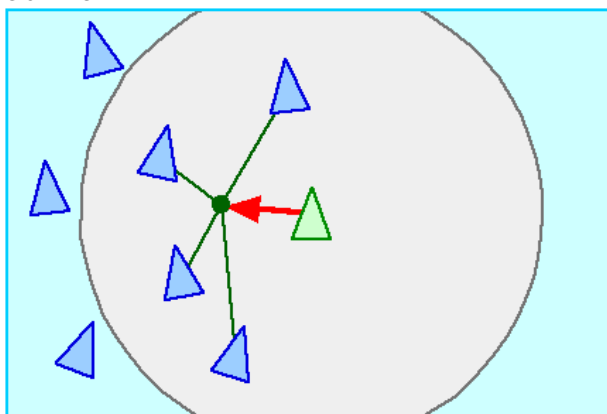
Wyrównywanie – sterowanie powodujące dostosowanie kierunku przemieszczenia agenta do wypadkowej kierunku sąsiadów. Aplikowana siła to różnica pomiędzy

pożądanym kierunkiem (średni kierunek sąsiadów) i obecnym wektorem kierunku osobnika.



Rysunek 2: Wyrównanie, źródło: [3]

Spójność- sterowanie odpowiedzialne za zbieranie się osobników w gromady. Częściowo przeciwstawne do rozdzielności. Aplikowana siła działa w kierunku środka ciężkości sąsiadów osobnika.



Rysunek 3: Spójność, źródło: [3]

Łączenie zachowań

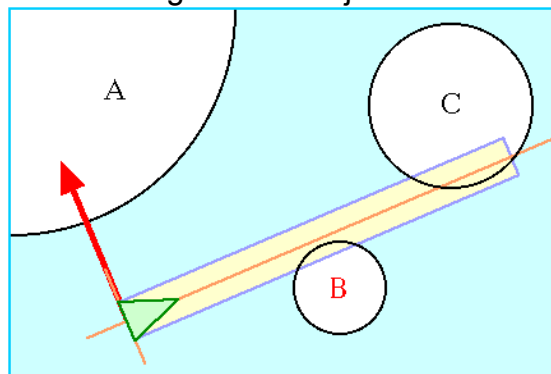
Połączenie 3 wymienionych zachowań daje efekt przypominający zachowanie stada. Łączenie odbywa się na zasadzie uśrednienia znormalizowanych trzech wektorów sił. Aby umożliwić zróżnicowanie wpływu poszczególnych zachowań na wypadkową mnoży się każde z nich przez ustaloną wagę po znormalizowaniu.

Można też dynamicznie ustalać wagi zachowań przez rezygnację z normalizacji na rzecz wcześniejszego skalowania wektorów. Wszystkie metody prowadzą do akceptowalnych wyników.

Po dodaniu nowych zachowań do zbioru, uśrednianie wyników może okazać się niedostatecznym rozwiązaniem. W niektórych szczególnych przypadkach osobniki powinny wybierać zachowanie o najwyższym priorytecie rezygnując z osłabiających efekt pozostałych. Przykładowo po napotkaniu drapieżnika osobniki powinny podjąć akcję ucieczki rezygnując ze spójności i wyrównania, które uniemożliwiałyby rozproszenie się i rozwinięcie pełnej prędkości przez najmocniejsze osobniki. (W rzeczywistości niektóre gatunki w obecności drapieżnika zamiast uciekać, zbierają się w zwartą grupę i w przypadku ataku próbują wspólnie go odeprzeć, co również wpisuje się w zasadę zmiany priorytetu zachowań skupiających ponad innymi w przypadku zagrożenia).

Unikanie

W kolejnym roku Reynolds dodał kolejne zachowanie określone, jako **unikanie** lub **omijanie przeszkód**. Jego zadaniem jest sterowanie zapobiegające zderzeniom agentów z przeszkodami. Wydał na ten temat krótki artykuł na konferencji SIGGraph '88 [14]. Rozważa tam kilka możliwości implementacji unikania, od prostego pola siłowego odpychającego od przeszkód w każdym kierunku do metody opartej na analizie obrazów „widzianych” przez osobniki. Najszerzej opisuje użytą przez siebie metodę polegającą na sterowaniu do uzyskania wolnej przestrzeni w cylindrze (prostokącie) przed obiektem. Brany pod uwagę jest tylko obiekt najbliższy cylindrowi. Jeżeli nie występuje kolizja, to zwracany wektor jest zerowy, w przeciwnym wypadku wektor sterowania jest skierowany prostopadłe do płaszczyzny przeszkody i ma wartość proporcjonalną do odwrotności odległości od niej.



Rysunek 4: Unikanie, źródło: [3]

Uzasadnienie modelu

Wybór modelu w postaci oddziaływujących ze sobą, kierowanych prostymi regułami, z ograniczoną percepcją środowiska był raczej naturalnym następstwem obserwacji natury. Zwierzęta w stadzie bardzo rzadko zderzają się. Większość takich przypadków zdarza się w sytuacjach krytycznych, jak ucieczka przed drapieżnikiem, co uzasadnia zasadę rozdzielności, a także istnienie pewnego priorytetu sterowania w sytuacji zagrożenia.

Liczne badania zachowań stadnych nie wykazały granicy ilości osobników. Dotyczy to głównie kluczy ptaków i ławic ryb. Obserwowano w naturze ławice składające się z milionów ryb rozległe na kilka kilometrów. Niezaobserwowany przy tym zmian reakcji poszczególnych osobników na bodźce, co prowadzi do kilku wniosków. Po pierwsze zwierzęta nie mają świadomości całego stada. Gdyby było inaczej przy rosnącym rozmiarze nie radziłyby sobie z przetwarzaniem danych i pojawiłaby się granica rozmiaru stada, gdzie nowe osobniki nie byłyby w stanie dołączyć. Po drugie brak zmian zachowania dowodzi braku wpływu odległych osobników na obiekt.

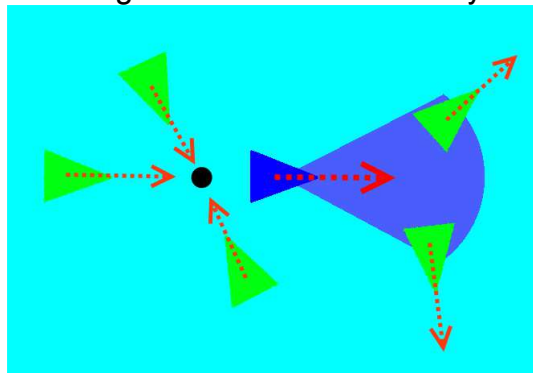
Szerokie umiejscowienie oczu większości zwierząt tłumaczy użycie szerokiego pola widzenia osobników. Ptaki widzą w zakresie około 300° . Jednocześnie ich pole widzenia stereoskopowego to jedynie około 15° , co tłumaczy późniejsze użycie wąskiego pola wykrywania przeszkód. Ryby oprócz oczu mają tzw. linię boczną, czują na zmiany ciśnienia wody powodowane m. in. przez sąsiednie osobniki. Brian Partridge w [4] pokazuje wyniki badań dowodzące, że ryby reagują na zachowania sąsiadów znajdujących się tylko w niewielkiej odległości.

Podążanie za liderem

(Opracowano na podstawie [3], [5], [6], [7], [8] i [9].)

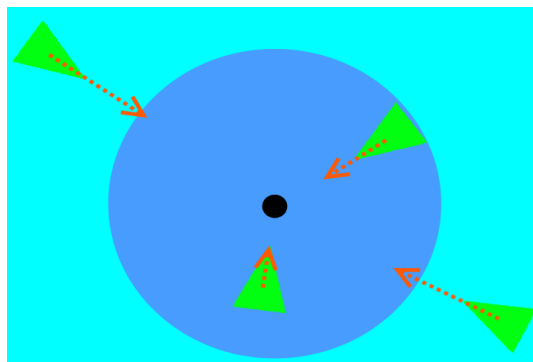
Stado bez określonego celu, stałego kierunku czy lidera, z czasem stabilizuje się osiągając optymalną pozycję, w której pozostaje, oscyluje lub wykonuje losowe drgania. Aby poruszanie grup było bardziej realistyczne stosuje się lidera bądź ich zespół, które mają na celu pociągnąć za sobą stado. W przeciwieństwie do zwykłych jednostek, nie podlegają podstawowym zasadą (rozdzielność, spójność, wyrównanie). Ich ruch determinuje cel, do którego chcą się dostać i zaprowadzić grupę.

Za liderem podążają inne osobniki niebędące liderem. Jeżeli w sąsiedztwie jednostki znajduje się kilku liderów, za przywódcę zostaje obrany ten, który jest najbliższy. Bazując na [3], możemy wypisać podstawowe zachowania lidera wobec innych osobników i odwrotnie. Celem każdego osobnika jest przebywanie jak najbliżej lidera, (jeśli jest obecny), uważając na to by na niego nie wpaść oraz by nie stać na jego potencjalnej drodze. Podążając za liderem osobnik stara się przestrzegać pozostałych zasad, a szczególnie zasady separacji, aby nie zajmować tej samej pozycji najbliższej lidera, co reszta. Na podstawie aktualnej prędkości lidera wyznacza się punkt znajdujący się niedaleko za jego pozycją, do tego punktu mają za zadanie dążyć pozostałe jednostki. Drugą przydatną rzeczą jest wyznaczenie obszaru przed liderem, którego podążający będą unikać by nie blokować drogi liderowi. Schemat na rysunku poniżej:



Rysunek 5: Lider, opracowanie własne na podstawie: [3]

Prędkość zbliżania się do lidera powinna stała poza najbliższym otoczeniem przywódcy, gdzie prędkość maleje wraz z malejącą odległością obu obiektów. Tak, aby do celu dojść z prawie zerową prędkością.



Rysunek 6: Przybywanie, opracowanie własne

Rola lidera w stadach czy rojach jest różna w zależności od obiektów, które chcemy zasymulować. Według publikacji [7], możemy rozdzielić to na dwa przypadki: Wymagające lidera oraz na te, które są samo organizujące. W drugim przypadku przywoływany jest przykład zachowania termitów, na które bez przywódcy są wstanie tworzyć złożone konstrukcje. Ciekawszy jest jednak przykład, w którym lider prowadzi grupę. Tutaj możemy dokonać następnego podziału posiłkując się publikacją [6]: Stada ze stałymi liderami oraz te ze zmiennymi. Stali liderzy występują najczęściej w grupach zwierząt, które grupują się w małe stada jak lwy czy wilki. W przypadku ptaków czy ryb gdzie stada (ławice) są bardzo duże, liderzy mogą być zmienni. Istnieje kilka parametrów, według których są dobierani.

„The leadership is derived from the boid position and the flock eccentricity”

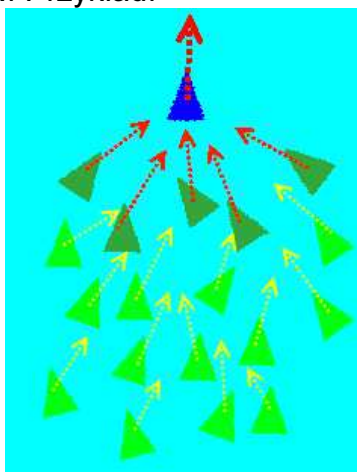
[6]

Największe szanse na zostanie liderem mają osobniki na brzegach grupy, gdyż tylko one mogą nagle zmienić swój kierunek pociągając za sobą resztę. Małe szanse na przywództwo mają również jednostki zajmujące pozycje na tyle grupy, jest to spowodowane faktem, że ich zmianę kierunku zauważy bardzo mała liczba osobników. Szerzej opisany przykład ptaków w [6], pokazuje to zjawisko dość jasno. Ptaki mogą krążyć w jednym miejscu, aż jakiś osobnik z brzegu grupy się wyłamie, a za nim podążą inne. Po pewnym czasie ptak najpewniej zostanie wchłonięty do środka grupy, wtedy inny ptak może przejąć rolę lidera i pokierować grupę w inne miejsce. Zgodnie z artykułem [8] zwierzęta stadne, a w tym przypadku ryby w ławicach często zmieniają lidera, z trzech powodów. Pierwszym powodem jest dynamika grupy, która może zniwelować i pochłoniąć jednostkę. Drugim jest natomiast sprawa bezpieczeństwa, osobniki na brzegach, czyli te, które mogą kierować grupą są bardziej narażone na pożarcie. Ostatnim czynnikiem, jest minimalizowanie wysiłku potrzebnego do przemieszczania się. Jednostki na brzegach często, (choć nie zawsze wyjątek ławice ryb [8]), szybciej się męczą, przez większe opory stawiane im przez np. powietrze.

Jak pokazują autorzy w [6]:

„In our research, the change of leadership, can act as a complementary force to the alignment”

Rozwijać tą myśl można zauważyć jak te dwie siły są ze sobą ściśle połączone. Nie jest konieczne by lider był w zasięgu zmysłów danej jednostki by ta podążyła za nim. Za liderem może podążać mała liczba osobników, jednak te położone dalej dostosują swoją prędkość (Alignment) do tych, które widzą lidera. Taki łańcuch zależności przy odpowiednich parametrach jest w stanie pociągnąć duże masy osobników, przez stosunkowo małą grupę liderów. Przykład:



Rysunek 7: Łańcuch podążania, opracowanie własne

Badania Stefano Marrasa oraz Maurizio Porfiri'ego przytoczone w artykule [9], pokazały, że ławice mogą podążać za rybą-robotem, który może je zaprowadzić w dowolne miejsce. Nawet nieruchoma ryba robot przyciągała na krótki okres ryby, które szukały lidera.

Reakcja na drapieżnika zagrażającego stadu

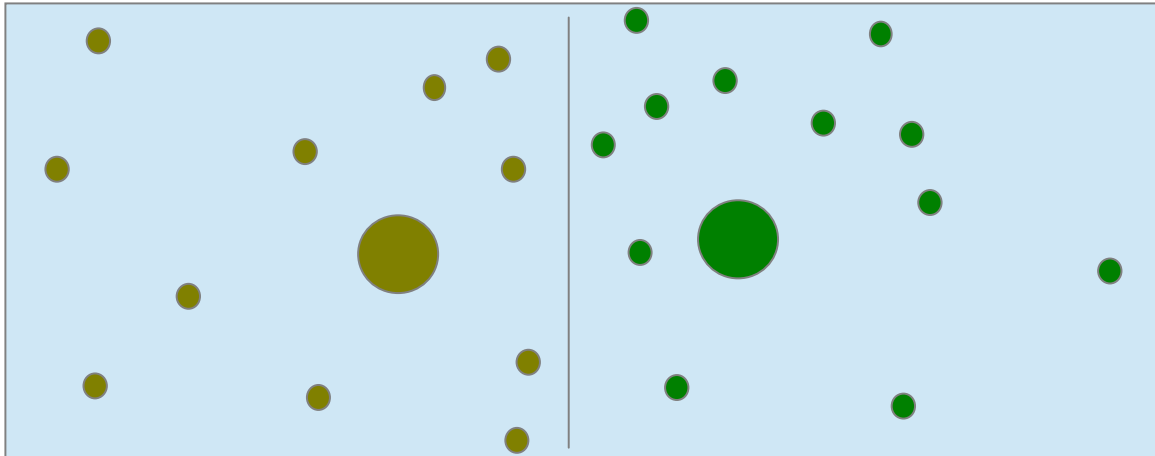
W tym podrozdziale znajdują się definicje i zasady związane z zachowaniem zwierząt wobec ataku drapieżnika. W większości informacje te dotyczą teorii W. D. Hamiltona („Selfish herd theory”). Jednak pierwsze zachowanie zwierząt, o którym będzie mowa, dotyczy efektu wywołanego liczebnością osobników:

Predator confusion effect - metoda zaproponowana i zademonstrowana przez Milinski i Heller (1978) , zachowanie udaremniające zamiar drapieżnika. Teoria ta, potwierdzona symulacjami i eksperymentami, bazuje na przeciążeniu sensorycznym drapieżnika (dotyczącym jego wzroku), co powoduje trudności w złapaniu pojedynczej zdobyczy [13].

Many eyes - druga teoria mówi o wzroście czujności, wraz z wzrostem grupy, spowodowanym ilością zwierząt, które mogą zauważyć drapieżnika [13].

Egoistyczne stado (Selfish herd theory) - mówi o tym, że osobniki w populacji próbują zmniejszyć własne ryzyko. Robią to poprzez ustawienie swojej pozycji w taki sposób, że inny osobnik znajduje się pomiędzy nim a drapieżnikiem. Teoria zaproponowana została przez W. D. Hamiltona w 1971 i przedstawiona w [10] . Podstawową zasadą teorii jest to, że w skupisku największe ryzyko pada na zwierzęta znajdujące się na obrzeżach. Im bardziej w głąb, tym mniejsze ryzyko, dotyczące ataku drapieżnika. Według teorii, dominujące osobniki powinny uzyskać bezpieczniejszą pozycję wewnątrz, natomiast zwierzęta im podległe zostaną zmuszone by zajmować pozycje mniej bezpieczne.

Domena zagrożenia (The domain of danger) - na przykładzie żab i węży wodnego, obszar związany z osobnikiem, w którym znajdujące się punkty są bliższe danemu osobnikowi niż innym osobnikom . W danym przykładzie żaby były atakowane w losowych punktach. Gdy atak został rozpoczęty wewnątrz DOD danego osobnika, ten osobnik byłby zaatakowany i prawdopodobnie zabity. Tak, więc ryzyko każdej żaby było współzależne z wielkością DOD.



Rysunek 8: „Domain of danger” na podstawie definicji powyżej, opracowanie własne (przypadkowe punkty bliższe danej żabie mają ten sam kolor, co ta żaba)

DOD może być wymierzona za pomocą diagramu Voronoia wokół grupy członków. Taka konstrukcja tworzy serie wielokątów wypukłych („convex polygons”) wokół każdego osobnika, w których wszystkie punkty w danym wielokącie osobnika są bliżej tego osobnika niż innych jednostek.

Zasady ruchu

Viscido, Miller, i Wetthey zidentyfikowali czynniki rządzące zasadami ruchu.

- „Nearest Neighbor Rule” - zwierzęta zmierzają w kierunku swojego najbliższego sąsiada. Mechanizm oryginalnie zaproponowany przez Hamiltona. Jednak przy małej ilości, podążanie za najbliższym sąsiadem niekoniecznie może powodować oddalenie się od krawędzi stada, czyli uzyskanie bezpieczniejszej pozycji.
- „Time Minimization Rule” - zwierzęta zmierzają w kierunku swojego sąsiada po czasie (rozważane tu są biologiczne ograniczenia zwierzęcia jak i jego orientacja w przestrzeni) to na pewno?
- „Local Crowded Horizon Rule” - osobniki w populacji rozważają pozycje wielu lub wszystkich członków, w kierowaniu swoim własnym ruchem.

Badania ujawniły różnorodność czynników, mogących wpływać na zasady ruchu np.:

- początkowe położenie przestrzenne
- gęstość zaludnienia
- strategia ataku drapieżnika
- czujność

Zwierzęta początkowo zajmujące pozycje centralne mają większe szanse na pozostanie tam niż inne.

„**Escape-Route Strategies**” – w czasie ucieczki w grupie, bezpieczniejszą pozycją staje się raczej przód stada, natomiast osobniki z tyłu są najbardziej narażone. Właśnie te osobniki na końcu muszą podjąć decyzję czy zostają przy stadzie, czy je opuszczają i sygnalizują swoją słabość. Ich właśnie ta decyzja może wpłynąć na decyzję osobników z przodu.

5 typów przywództwa stada (na podstawie decyzji lidera):

- Wybrana droga (przez lidera) okazuje się być na korzyść całego stada
- Wybrana droga (przez lidera) zmniejsza jego ryzyko, a nie całkowite ryzyko stada

- Wybrana droga (przez lidera) jest korzystna dla większości, ale możliwe, że nie dla najszybszych
- Wybrana droga (przez lidera) jest korzystna dla najwolniejszych, ale może być trudniejsza dla reszty
- Wybrana droga (przez lidera) jest trudna dla wszystkich, ale jest praktycznie niemożliwa dla najwolniejszych

Chociaż niektóre typy ucieczki wydają się działać na korzyść członków grupy to, wspierając stabilność stada, zmniejszają ryzyka lidera.

Zdobywanie pożywienia w stadzie

W tym podrozdziale, na początku zostanie opisane żerowanie w gromadzie. Pojawia się również informacje o modelach „Optimal foraging theory”.

Na końcu, jako przykład symulacji, zostanie opisany model związany z zdobywaniem pożywienia, zastosowany do mongolskich gazeli, w którym ważna jest komunikacja głosowa między zwierzętami.

Żerowanie w gromadzie („Social foraging”)

Podział na 3 odrębne typy żerowania w gromadzie, podzielone według poziomu współpracy:

- W sytuacji, kiedy jedno zwierzę patrzy na inne, które konsumuje, może dojść do konkurencji o jedzenie i utraty posiłku przez właściwego znalazcę.
- Kooperacyjne łowiectwo. Zwierzęta mogą współdziałać, aby złapać nieuchwytną zdobycz lub powalić większą.
- Skrajna współpraca u eusocjalnych zwierząt. Konkurencyjne interakcje w związku z żywnością są zminimalizowane albo nie istnieją. Jedzenie jest zwracane do gniazda, dla przydziału opartego na potrzebach kolonii.

Modele optymalnego żerowania „Optimal foraging theory”

Modele optymalnego żerowania próbują przewidzieć zachowanie zwierzęcia, podczas gdy poszukuje jedzenia, miejsca lęgowego, lub innych kluczowych rzeczy.

W optymalnym żerowaniu występują dwa ważne kierunki badań:

- jak zwierzęta podejmują decyzje
- Próba użycia zasad „optimal foraging theory”, aby rozwijać zrozumienie dynamiki na poziomie populacji i komunikacji

Mongolskie gazy:

Grupa fizyków i ekologów prowadzonych przez Ricardo Martínez-García z Institute for Cross-Disciplinary Physics and Complex Systems in Palma de Mallorca, w Hiszpanii stwierdziła, że mało zbadano to jak i czy, komunikacja między zwierzętami pomaga konkretnym działaniom, przynoszącym zysk dla członków grupy jak np. zdobywanie jedzenia.

Zespół stworzył model stada zwierząt, jako „cząstek”, poruszających się na przestrzeni dwuwymiarowej. Równanie ruchu zwierząt zawierało trzy określenia/zasady:

- Pierwsze, związane z bogactwem roślinności na obszarze krajobrazu, powodowało ruch każdego zwierzęcia w stronę lepszego miejsca do **wypasu**
- Drugie, to określenie, powodujące ruch każdego zwierzęcia w sposób, zależny od tego, co **usłyszał** od innych zwierząt

- W końcu „biały szum”(„white noise”), który wpłatywał element **losowy** lub ruch Browna(„Brownian motion”).

Tworzenie określenia komunikacji wymagało dalszych założeń:

- Zwierzę będzie emitowało ciągły sygnał tylko, kiedy napotka odpowiednio bogatą roślinność
- Te sygnały słabną z odległością, poprzez odwrotnie kwadratowy spadek, ale również poprzez spadek spowodowany efektami temperatury powietrza i wilgotnością, które zmieniają się wraz z częstotliwością.
- W reakcji na sygnał, osobnik będzie się poruszał w stronę dźwięku, wyliczonego, jako suma wektorowa dźwięków od innych zwierząt.

Badacze zastosowali swój model dla mongolskiej gazeli. Z zdjęć satelity wygenerowali mapę soczystości roślinności. Do kalibracji wielkości „białego szumu”, użyli odpowiednich badań („tracking studies”). Zakres, w którym mongolskie gazyłe mogą się komunikować nie był wprost znany, ale biorąc pod uwagę typowe warunki klimatyczne na otwartym stepowym krajobrazie, badacze mogli powiązać zakres z częstotliwością odgłosów: niższe dźwięki lecą dalej.

Przebieg symulacji

Zespół umieścił 500 gazeli w obszarze ok. 100km na 200km i zostawił je, aby wędrowały przez miesiąc. Gdy częstotliwość porozumiewania się była wysoka(15.8 kHz) lub niska (0.1 kHz) zwierzęta miały kłopoty ze znalezieniem jedzenia. Do najlepszych wyników (wszystkie zwierzęta znajdują bogatą roślinność w rozsądnym czasie) doszło dla częstotliwości nieco ponad 1 kHz.

Przegląd literatury

1. Boids,
Napisana przez Reynoldsa w Lispie implementacja Algorytmu Stada.
Wizualizacje algorytmu można obejrzeć w animacji „Stanley and Stella in Breaking the Ice”.
2. Opensteer, <http://opensteer.sourceforge.net/>
Projekt kierowany przez Craiga Reynoldsa. Zawiera implementacje podstawowych zachowań autonomicznych osobników a także wizualizację kilku z nich w OpenGL.
Podstawowe zachowania można łączyć uzyskując bardziej złożone.
Zaimplementowane m. in. flocking(Algorytm Stada), podążanie, ucieczka, omijanie przeszkód, kolejkowanie, przybywanie.
3. OpenSteerDotnet, <http://code.google.com/p/opensteerdotnet/>
Port biblioteki Opensteer do .NET
4. Sharpsteer,
Port Opensteer do C#.
5. Alplugin do jMonkeyEngine
Plugin do silnika gier 3D, zawiera podstawowy algorytm stada.
6. PandaSteer, <http://pandasteer.sourceforge.net/>
Implementacja Opensteer w Pythonie z silnikiem gier Panda3D.
7. Steeringbehaviors, <http://www.steeringbehaviors.de/>
Projekt w Javie, wiele zaimplementowanych zachowań osobników, włączając zachowania stadne. GUI umożliwia ręczne dodawanie osobników i przypisywanie im indywidualnie dobranych zachowań.
8. (Źródło/cytaty: <http://www.quartetti.net/Chris/papers/flocking/index.html>)
Projekt dotyczy symulacji ruchu ptaków w stadzie . Cały problem można podzielić na trzy podproblemy: symulowana percepcja, kontrola zachowań i fizyka lotu.
9. Bajec I. L., "FUZZY MODEL OF BIRD FLOCK FORAGING BEHAVIOR"
Autor opisuje model zachowania stada ptaków w sytuacji głodu niektórych osobników. Prezentuje wyniki symulacji i wpływ ilości głodnych osobników na ogólny ruch stada.

Bibliografia

- [1] Reynolds C. W. "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model"
- [2] Amkraut. S. Girard. M., Karl. G. "Motion studies for a work in progress entitled 'Eurythmy'"
- [3] Reynolds C. W. "Steering Behaviors For Autonomous Characters"
<http://www.red3d.com/cwr/steer/gdc99/>
- [4] Partridge B. L., "The Structure and Function of Fish Schools"
- [5] Charles Birch, " Biology and the riddle of LIFE "
- [6] Beneš B., Hartman C., „**Autonomous Boids**"
- [7] Evers C., Katyal K. „Paradoxes of leadership: contingencies and critical learning"
- [8] "Shoaling and schooling" - http://en.wikipedia.org/wiki/Shoaling_and_schooling
- [9] "What Makes a Robot Fish Attractive? (Hint: It's in the Moves)" - <http://www.poly.edu/press-release/2012/03/01/what-makes-robot-fish-attractive-hint-its-moves>
- [10] "Selfish herd theory" - http://en.wikipedia.org/wiki/Encounter_dilution
- [11] Michael D. Breed „Animal Behaviour" -
<http://www.animalbehavioronline.com/chaptertemplate.html>
- [12] Physics 6, 68 (2013)
„Focus: Animal Communication Could Support Efficient Foraging" - David Lindley -
<http://physics.aps.org/articles/v6/68>
- [13] "Collective animal behaviour" -
http://en.wikipedia.org/wiki/Collective_animal_behavior#Protection_from_predators