

# Framsticks: sztuczne życie – złożona symulacja stworzeń i ich ewolucji\*

Maciej Komosiński, Szymon Ulatowski

Instytut Informatyki, Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Maciej.Komosinski@cs.put.poznan.pl

<http://www.frams.poznan.pl/>

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wzorowany na naturze model symulacji sztucznych stworzeń. Model obejmuje mechaniczną symulację organizmów, ich interakcję ze środowiskiem, sterowanie siecią neuronową oraz ukierunkowaną i swobodną (*open-ended*) koewolucję. Przedstawiono złożony, trójwymiarowy system symulacji, w którym możliwe jest wybranie różnych kryteriów oceny w celu ewoluowania określonych gatunków, a także symulacja ewolucji swobodnej. W tym ostatnim przypadku zakłada się, że zdolności reprodukcyjne stworzeń są proporcjonalne do ich długości życia, co prowadzi do powstania współzawodnictwa o ograniczone zasoby potrzebne do egzystencji. Artykuł przedstawia opis modelu, rezultaty prostych eksperymentów przeprowadzonych dotychczas i wnioski z nich płynące. Projekt jest nadal rozwijany i mamy nadzieję, że stanie się realistycznym modelem umożliwiającym powstawanie zjawisk podobnych do naturalnych dzięki ewolucji swobodnej w zbliżonym do rzeczywistego, trójwymiarowym świecie stworzeń-patyczaków.

## I. WPROWADZENIE

Badania prowadzone w dziedzinie sztucznego życia dotyczą analizowania rzeczywistych, biologicznych organizmów na drodze tworzenia i studiowania stworzeń wirtualnych [12], [17]. Sztuczne organizmy nie muszą dokładnie odpowiadać formom istniejącym naprawdę, aczkolwiek istotne jest, by podczas tworzenia modelu pamiętać o zawarciu w nim wszystkich istotnych cech. Jest to ważne szczególnie wówczas, gdy formy sztucznego życia są analizowane, opisywane i porównywane z rzeczywistością. Istniejące eksperymenty sztucznego życia tworzą dwie grupy: pierwsza z nich to eleganckie, matematyczne (choć często proste) modele. Są one często wykorzystywane do rozważań teoretycznych albo do walidacji hipotez biologicznych – na przykład dotyczących koewolucji w grze *pursuer-evader* [7], [8], czy też ewolucji sieci pajęczych i oczu [6]. Drugą grupę stanowią stosunkowo skomplikowane modele, w których mechanizmy ewolucyjne nie mają tak silnego podłoża naukowego i biologicznego, a które skupiają się na realistycznej symulacji, grafice [20], [19], [18] lub zastosowaniach w rozrywce [14], [13]. Istnieje pewna luka pomiędzy istotnymi z punktu widzenia nauki modelami sztucznego życia oraz zaawansowanymi narzędziami symulacji i ich realizmem. W opisywanym projekcie starano się wypełnić wspomnianą lukę dzięki zebraniu zalet obu wymienionych grup: model symulacji we **Framsticks** jest możliwie realistyczny biologicznie [2], podczas gdy model ewolucji daje szerokie możliwości dla wielu zróżnicowanych eksperymentów.

---

\*Materiały konferencyjne III Krajowej Konferencji Algorytmy Ewolucyjne i Optymalizacja Globalna KAEiOG, Potok Złoty, 25-28 Maj 1999, 157-166.

W przedstawianym projekcie sztucznego życia można wyróżnić dwa aspekty: algorytm ewolucyjny oraz symulację samych stworzeń. Ta ostatnia polega na symulowaniu wirtualnego, trójwymiarowego świata i organizmów (ich „ciała” – struktury i „mózgów” – sterowania), które są zdolne do interakcji z innymi organizmami (do ich lokalizacji, odpychania, uszkodzania, zabijania, zjadania itp.) i ze środowiskiem (chodzenie, pływanie itp.). Sztuczny świat nie musi dokładnie odzwierciedlać świata rzeczywistego: zakłada się, że symulacja o rozsądnej złożoności będzie wystarczająca, by umożliwić powstanie realistycznych zachowań i zjawisk. Stworzenia składające się z segmentów („patyków” – *sticks*), w porównaniu z pełnymi bryłami, są prostsze w symulacji, a mają wystarczający potencjał do wykształcenia złożonych zachowań. Ich środowisko może być złożone z dowolnej kombinacji płaskiej ziemi, wzgórz i wody. Ewolucja może być ukierunkowana według zdefiniowanych w symulatorze kryteriów oceny. Ukierunkowanie ewolucji na długość życia odpowiada ewolucji swobodnej (spontanicznej): dłuższe życie zapewnia większe zdolności reprodukcyjne, a do przedłużenia życia niezbędne jest zdobycie zasobów (energii) ze środowiska.

Choć przeprowadzono dotychczas wiele różnych eksperymentów [16], [1], [19], [20], [3], nie przedstawiono jeszcze doświadczeń z ewolucją spontaniczną tak złożonych organizmów w tak skomplikowanym środowisku, jak tu przedstawiane. Należy zauważyć, że nie tylko sama sieć neuronowa [4], [5], lecz również struktura fizyczna „insektów” podlega równoczesnej ewolucji. Mamy nadzieję, że model jest wystarczająco rozbudowany, by umożliwić powstanie różnorodnych, realistycznych zależności i zachowań, a zarazem wystarczająco prosty, by mógł być symulowany na istniejących komputerach.

W rozdziale II opisano architekturę systemu **Framsticks** oraz modele ewolucji i symulacji. W rozdziale III skupiamy się na własnościach ewolucyjnych systemu, opisując reprezentację genotypu oraz operatory genetyczne (krzyżowanie i mutację). W rozdziale IV przedstawiono rezultaty dotychczasowych eksperymentów, a rozdział V podsumowuje pracę i prezentuje kierunki dalszych badań.

## II. MODEL SYMULACJI

### A. Architektura systemu

Celem było zaprojektowanie symulatora **Framsticks** tak, by umożliwiał ewolucję swobodną (wraz z dobozem naturalnym) stworzeń-patyczaków sterowanych sieciami neuronowymi w trójwymiarowym świecie [10]. Jednakże model ten różni się od prawdziwej ewolucji spontanicznej: zasady selekcji i reprodukcji są tu nieco inne. W rzeczywistym świecie i pewnych symulatorach sztucznego życia (Tierra [16], Avida [1]), zasady te wynikają z warunków życia symulowanych organizmów. Interakcje pomiędzy stworzeniami i środowiskiem powodują, że jedne gatunki przeżywają, podczas gdy inne wymierają.

W symulatorze **Framsticks** zasady ewolucji są z góry zdefiniowane – podobnie, jak to jest w innych modelach ewolucyjnych przeznaczonych do optymalizacji, np. w algorytmach genetycznych [9], [15] i większości symulatorów sztucznego życia [4], [5], [19], [20]. Tak więc stworzenia są ewolucyjnie optymalizowane według pewnych predefiniowanych kryteriów. Jednakże możliwe jest naśladowanie ewolucji swobodnej przy użyciu modelu ukierunkowanego. Ma to miejsce wtedy, gdy wybrane kryterium oceny odzwierciedla zdolności przeżycia i reprodukcji osobników.

Taka właśnie idea została wykorzystana w symulatorze **Framsticks**. Możliwa jest symulacja ewolucji swobodnej, kiedy kryterium oceny jest długość życia. Ukierunkuje to

ewolucję tak, by osobniki na etapie selekcji wybierane były proporcjonalnie do ich długości życia – a zatem, im dłużej żyje stworzenie w środowisku, tym lepiej jego genotyp rozmnaża się w populacji. Taka imitacja ewolucji spontanicznej jest racjonalna; co prawda można by symulować rodzenie dzieci lub składanie jaj, których ilość byłaby proporcjonalna do długości życia rodziców i zależałaby od ich energii, lecz takie specyficzne mechanizmy nie muszą być konieczne symulowane – o ile już długość życia zależy od zdobytych zasobów i bezpośrednio wpływa na sukces rozrodczy.

Głównym modułem systemu jest symulator ewolucji. Jest on odpowiedzialny za utrzymywanie zbioru istniejących aktualnie w populacji osobników i ich danych, przeprowadzanie selekcji i stosowanie operatorów genetycznych. Do selekcji osobników potrzebne są ich oceny – ocenianiem organizmów zajmuje się moduł symulacyjny. Nie wszystkie osobniki muszą być symulowane jednocześnie: jedynie część z nich jest w danym momencie oceniana w wirtualnym świecie. Taki sposób dekompozycji procesu oceniania podobny jest do techniki *windowing* znanej z uczenia maszynowego (gdzie tylko część przykładów uczących jest dostępna dla uczenia w danym momencie), albo do koncepcji pamięci wirtualnej (jedynie mały fragment całej przestrzeni pamięci znajduje się w RAM). Tak więc świat wirtualny nie zawiera całej populacji osobników, a tylko jej określoną część. Sztuczny świat jest zredukowanym modelem całego ekosystemu. O ile architektura jest właściwie zdefiniowana, a parametry racjonalnie dobrane, takie podejście niewiele się różni od sytuacji, w której wszystkie osobniki są symulowane naraz. Opisywana technika ma ponadto następujące zalety:

- kilka osobników jest symulowanych dużo szybciej niż kilka tysięcy, zatem można oglądać symulację w czasie rzeczywistym, studiować zachowanie stworzeń i wpływać na nie,
- podczas zapamiętywania stanu ewolucji wystarczy jedynie zapisać osiągi (*performance*) każdego osobnika, zaniehbując bieżący stan symulowanego świata. Jest to niewiele danych i może być łatwo zapisane i odczytane w celu kontynuowania ewolucji danej populacji. Symulacja wszystkich osobników naraz wymagałaby zapisania znacznie większej ilości informacji o każdym osobniku i wszystkich jego częściach w wirtualnym świecie.

W opisanym architekturze modelu występują dwa parametry: maksymalna liczba osobników,  $N$ , i maksymalna liczba osobników jednocześnie symulowanych,  $n$ . Moduł symulacyjny wybiera osobniki do symulacji i oceny, kiedy w wirtualnym świecie jest wolne miejsce (gdy liczba aktualnie symulowanych osobników jest mniejsza niż  $n$ ). Kiedy organizm umiera, wyznaczane są jego osiągi i bazująca na nich wartość dopasowania (*fitness*). Jest ona potrzebna w fazie selekcji, bowiem od niej zależy prawdopodobieństwo wybrania osobnika, poddania działaniu operatorów genetycznych i ocenieniu (symulacji).

Zwykle  $n$  jest znacznie mniejsze niż  $N$ . Kiedy interakcje między symulowanymi stworzeniami nie są istotne,  $n$  może być jedynką (symulowany jeden osobnik naraz). Większe wartości  $n$  oznaczają, że symulowana jest większa część całej populacji osobników, a zatem może wystąpić więcej interakcji pomiędzy stworzeniami. Tak więc ustawiając parametr  $n$ , należy wziąć pod uwagę również wielkość wirtualnego świata.

## B. Symulacja fizyczna

Moduł używany do oceny osobników (genotypów) symuluje stworzenia i ich środowisko. We **Framsticks** wykorzystano trójwymiarowy symulator zakładając, że szeroki wybór złożonych i zróżnicowanych bodźców wpływających na organizmy umożliwi wszechstronny rozwój zachowań. Pierwszymi badanymi zachowaniami były mechanizmy poruszania się i orientacji w środowisku, tak więc zapewniono wszelkie rodzaje interakcji pomiędzy obiektami

fizycznymi: tarcie statyczne i dynamiczne, tłumienie, siły akcji i reakcji, straty energii przy odkształceniach, grawitację i siłę wyporu (w środowisku wodnym).

Celem symulacji nie było odwzorowanie wszystkich szczegółów obecnych w świecie rzeczywistym. Nie symuluje się kolizji pomiędzy częściami jednego organizmu ani ruchu ośrodka wodnego. Co prawda włączenie tych aspektów do symulacji uczyniłoby ją bardziej realistyczną, lecz nie wprowadziłoby żadnych jakościowo nowych (istotnych z punktu widzenia symulowanych stworzeń) zjawisk. Takie detale zostały więc pominięte ze względu na ich dodatkową złożoność obliczeniową.

Zastosowany model narzuca pewne reguły dotyczące struktury organizmów. Podstawowym elementem jest segment („stick”) składający się z dwóch punktów materialnych połączonych elastycznie (do symulacji użyto metody elementów skończonych). Segmenty mogą specjalizować się w pewnych funkcjach, takich jak wytrzymałość, zdolność wchłaniania, fotosyntezy i siła mięśni, przy czym specjalizacja w pewnym kierunku pogarsza pozostałe właściwości segmentu.

Każdemu symulowanemu elementowi przypisano zbiór chwilowych parametrów fizycznych: położenie  $P$  (wektor trójwymiarowy), orientację w przestrzeni, prędkość (wektor trójwymiarowy) oraz momenty pędu według osi  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . W pojedynczym kroku symulacji wyznacza się wartości tych parametrów po upływie kwantu czasu  $\Delta t$ , zgodnie z zasadami dynamiki, prawem sprężystości, tłumienia, itd. Obliczenia takie są przybliżone w stosunku do rzeczywistości ze względu na dyskretny charakter upływu czasu, stąd potrzebny jest kompromis pomiędzy dokładnością i prędkością obliczeń. Potencjalnie każdy symulowany element mógłby wpływać na wszystkie pozostałe (złożoność kwadratowa), jednak w praktyce oddziałuje on przez połączenia struktury organizmu jedynie na elementy z nim połączone.

Na segmentach mogą być umieszczane neurony (tworząc dowolne topologie sieci) i receptory. Mięśnie umieszczane są na połączeniach segmentów. Obecność mięśnia zmienia właściwości połączenia – sygnał kontrolujący mięsień zmienia względne położenie przylegających segmentów. Występują dwa rodzaje mięśni: zginające i obracające. Sygnał zerowy czyni mięsień neutralnym (tak, jakby on nie istniał). Dodatnie i ujemne zmiany sygnału powodują ruch segmentu w obu kierunkach – jest to analogiczne do naturalnych systemów mięśni, ze zginaczami i prostownikami. Określa się również maksymalną siłę mięśnia (parametr ten jest pod kontrolą ewolucji). Praca mięśnia powoduje zużycie energii.

W pierwszych eksperymentach ruch mięśni zależał jedynie od sygnałów neuronów sterujących (model miał być możliwie prosty, ale nie zbyt restrykcyjny). Powstałe na drodze ewolucji stworzenia wykorzystywały wówczas nienaturalny sposób poruszania się za pomocą szybkich, małych ruchów mięśni i rezonansu kończyn. Model musiał więc zostać zmieniony tak, by mięśnie nie dysponowały pełną mocą w dowolnym momencie, lecz potrzebowały czasu aby przestawić się na oddziaływanie inną siłą lub na odwrócenie kierunku działania (jako, że pojedynczy mięsień w symulatorze może zastąpić dwa antagonistyczne mięśnie biologiczne).

### C. Sieć neuronowa

Neurony użyte we **Framsticks** są podobne do tych używanych w sieciach neuronowych i uczeniu maszynowym. Wprowadzono pewne dodatkowe parametry, które mogą zmieniać zachowanie każdego neuronu niezależnie. Nie zastosowano skomplikowanych i nienaturalnych jednostek przetwarzających sygnały (jak w [19]); w trakcie wstępnych testów udowodniono, że możliwe jest stworzenie z prostych neuronów całkiem złożonych modułów (całkujących, różniczkujących, sumujących, odejmujących i generatorów o różnym kształcie przebiegów). Jako że połączenia pomiędzy neuronami są w genotypie opisane relatywnie,

podczas krzyżowania całe moduły funkcjonalne mogą zostać wymienione pomiędzy osobnikami.

Neurony stosują prostą zasadę sumy ważonej sygnałów wejściowych. Pobudzenie wpływa na stan neuronu (który posiada pewną bezwładność). Silne sygnały powodują szybszą, niż sygnały słabe, zmianę stanu. Wyjście neuronu normalizowane jest do przedziału  $\langle -1, +1 \rangle$  za pomocą funkcji sigmoidalnej (3). Krótkie i silne impulsy dają podobne rezultaty, jak długie i słabe. Silne sygnały mogą prowadzić do nasycenia neuronu.

Właściwości neuronów mogą być dodatkowo zmieniane przez pewne parametry (będące pod kontrolą ewolucji i opisane w genotypie). Owe trzy parametry nazwijmy odpowiednio *force*, *inertia* i *sigmoid*. *Force* i *inertia*, nazwane tak przez analogię do wielkości fizycznych w ruchu punktu materialnego z tłumieniem, wpływają na zmiany wewnętrznego stanu neuronu. W każdym kroku symulacji stan neuronu jest zmieniany w kierunku wartości obliczonej z wejściowych pobudzeń. Parametr *Force* określa, jak szybko stan jest zmieniany (duże wartości dają natychmiastową reakcję, niskie wartości powodują łagodne ładowanie i rozładowywanie). *Inertia* określa bezwładność (utrzymanie tendencji zmian). Niskie wartości powodują niewielki wpływ na stan neuronu, natomiast wartości wysokie mogą prowadzić do jego oscylacji. Parametr *Sigmoid* zmienia kształt funkcji sigmoidalnej. Dla wartości parametrów *Force*=1 i *Inertia*=0 uzyskuje się model neuronu stosowany zwykle w sieciach neuronowych i uczeniu maszynowym. Wzory (1), (2) i (3) opisują pracę neuronu; dalsze szczegóły i przykładowe przebiegi zamieszczono w [11].

$$v_t = v_{t-1} \cdot inertia + force \cdot (i_t - s_{t-1}) \quad (1)$$

$$s_t = s_{t-1} + v_t \quad (2)$$

$$o_t = \frac{2}{1 + e^{-s_t \cdot Sigmoid}} - 1 \quad (3)$$

gdzie:

$i$  – sumaryczna wartość na wejściu neuronu: suma ważona wszystkich wejść neuronu,  
 $v$  – analog prędkości w ruchu punktu materialnego,  
 $s$  – stan wewnętrzny neuronu (analog położenia punktu materialnego),  
 $o$  – wartość wyjścia neuronu,

a indeksy dolne określają moment czasu.

Istotnym aspektem pracy sieci neuronowej jest jej interakcja z wirtualnym światem. Łącznikami pomiędzy siecią i środowiskiem są receptory i efekторы (mięśnie). Obecnie wykorzystywane są trzy rodzaje receptorów: do orientacji w przestrzeni (zmysł równowagi, żyroskop), wykrywania energii/pożywienia (węch) i wykrywania kontaktu fizycznego (dotyk). Receptor podłączony jako wejście neuronu jest źródłem sygnału pochodzącego ze środowiska, podobnie jak mięsień podłączony do wyjścia neuronu służy wpływaniu na środowisko i właściciela. Mięśnie opisano w poprzednim podrozdziale.

### III. EWOLUCJA

#### A. Reprezentacja genotypu

We **Framsticks** użyto całkowicie tekstowej reprezentacji genotypu, zatem może być ona łatwo odczytywana i modyfikowana przez człowieka. Fenotypowe właściwości segmentów mają charakter lokalny, lecz podlegają propagacji wzdłuż struktury fizycznej (z malejącym natężeniem). Oznacza to, że kiedy część genotypu przenoszona jest w inne miejsce – większość właściwości (i połączeń sieci neuronowej) pozostaje nienaruszonych. Występuje odwzorowanie 1:1 – genotyp opisuje dokładnie wszystkie części odpowiadającego fenotypu. Małe zmiany w genotypie odpowiadają niewielkim zmianom w powstałym stworzeniu. Elementy sterujące (neurony, receptory) są skojarzone z elementami sterowanymi (mięśniami, segmentami). Jedynie struktury drzewiaste mogą być obecnie opisywane (a więc cykle w budowie fizycznej nie są dozwolone).

Zarówno struktura fizyczna („ciało”), jak i sieć neuronowa („mózg”) są opisane razem w genotypie. Ciało składa się z segmentów (każdy oznaczony jako „X” w genotypie), które mogą się rozgałęziać (co jest oznaczone nawiasami). Przed znakami „X” mogą występować modyfikatory, zwiększające lub zmniejszające właściwości segmentu, takie jak obrót, skrzywienie, długość, waga, energia, zakrzywienie, tarcie, siła mięśni, wytrzymałość i zdolności do wchłaniania energii (z pożywienia) i jej fotosyntezy.

Mózg składa się z neuronów (w genotypie opisanych w nawiasach kwadratowych). Każdy neuron może kontrolować mięsień obracający lub zginający. Neurony mogą mieć dowolną liczbę wejść i związanych z nimi wag. Wejścia mogą być podłączone do wyjść innych neuronów, do receptorów lub do stałych wartości. Dodatkowo można w genotypie opisać specjalne parametry sterujące charakterystyką danego neuronu (patrz podrozdział II.C). Istotną cechą neuronów jest to, że ich połączenia reprezentowane są relatywnie (np. „połączenie danego wejścia z wyjściem neuronu poprzedniego, a wejścia kolejnego z wyjściem piątego neuronu za niniejszym”). Taki sposób opisu połączeń pozwala na przetrwanie operacji krzyżowania przez fragmenty sieci neuronowej: cały zbiór połączonych neuronów może być przesunięty w inne miejsce w genotypie (i w stworzeniu), być może nawet z kończynami, i nadal zachować swoją funkcjonalność.

Wprowadzono dwa operatory genetyczne: krzyżowanie i mutację. Mutacja dotyczy wielu aspektów zmian w genotypie, przy czym względne prawdopodobieństwo zmiany każdego typu może być indywidualnie ustalone, a pewne typy mutacji mogą zostać wyłączone. Mutacje powodują dodanie lub usunięcie segmentu, zmianę jego właściwości, dodanie lub usunięcie rozgałęzienia, dodanie lub usunięcie neuronu lub wejścia (połączeń), zmianę wag w sieci neuronowej, dodanie lub usunięcie receptorów itp.

Operacja krzyżowania jest dwupunktowa. Posiada dwa argumenty – genotypy przodków i daje w rezultacie dwa genotypy potomków. Genotypy osobników są zwykle różnej długości. Wybór wymienianych fragmentów genotypów może przebiegać na dwa sposoby. Pierwszy z nich to podejście typowe, kiedy wszystkie cztery miejsca cięcia ustala się losowo. W drugiej metodzie (krzyżowaniu proporcjonalnym) jedynie w dłuższym genotypie wybiera się dwa punkty cięcia losowo; w krótszym z nich punkty te wyznacza się proporcjonalnie do długości genotypu krótszego na podstawie wylosowanych punktów z genotypu dłuższego. Jest to istotne wtedy, gdy krzyżowane są tylko osobniki podobne (z jednego gatunku) – wówczas takie krzyżowanie sprzyja zachowaniu istniejących gatunków, gdyż dzieci są podobne do rodziców.

Poza opisanymi metodami krzyżowania dwóch osobników wprowadzono dodatkowo krzyżowanie „ze sobą” i „z pustym”. Pierwsza możliwość oznacza, że dwaj potomkowie są

identyczni (w praktyce wybiera się jeden genotyp i klonuje się go). Druga odpowiada usunięciu losowego fragmentu genotypu. Parametry systemu określają, jaka część osobników poddawanych podczas ewolucji operacjom genetycznym powinna być nie zmieniana, jaka część mutowana, jaka krzyżowana parami, a jaka krzyżowana „ze sobą” i „z pustym”.

Często zdarza się, że po krzyżowaniu i mutacjach genotypy nie są poprawne z powodu niewielkich błędów. Dlatego wprowadzono prostą procedurę naprawy. Mechanizm taki, podobnie jak w naturze, potrafi naprawiać małe błędy w genotypie.

### *B. Selekcja i specjacja*

Kiedy ma powstać nowy osobnik, symulator wybiera z populacji istniejący genotyp (lub dwa do krzyżowania) używając standardowej reguły ruletki [9]. Prawdopodobieństwo wybrania genotypu (osobnika) jest proporcjonalne do jego dopasowania. Później stosowane są operatory genetyczne.

W warunkach naturalnych grupy podobnych osobników dzielą ze sobą te same nisze ekologiczne i tworzą gatunki. We **Framsticks** podobieństwo osobników do innych obniża jego dopasowanie [9]. Taki mechanizm wprowadza presję, by dywersyfikować populację osobników i dążyć do utrzymania gatunków. Drugi mechanizm umożliwiający specjację to specyficzna (proporcjonalna, opisana w III.A) operacja krzyżowania, której poddawane są jedynie osobniki podobne, i która wymienia odpowiadające sobie fragmenty genotypów rodziców.

Wspomniane mechanizmy wymagają zdefiniowania funkcji podobieństwa (odległości) pomiędzy rozwiązaniami (osobnikami). Jednakże kiedy fenotypy są bardzo złożone, utworzenie dobrej miary podobieństwa może być zadaniem trudnym. Obecnie funkcja podobieństwa jest sumą ważoną kilku prostych kryteriów, takich jak złożoność struktury, złożoność sieci neuronowej, czy podobieństwo strukturalne.

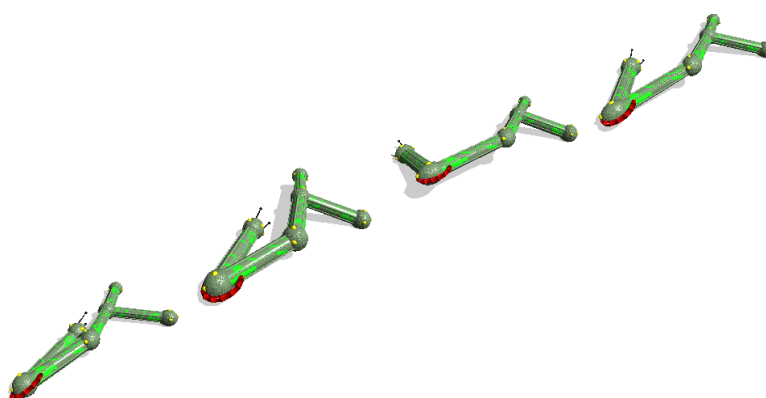
### *C. Ocena osobników*

Celem **Framsticks** jest symulowanie ewolucji, w której jedynym kryterium oceny żyjących organizmów będzie ich zdolność do reprodukcji (przekazywania genów). Możliwe jest jednak ukierunkowanie ewolucji poprzez zdefiniowanie wielu kryteriów oceny osobników. Podczas życia organizmów mierzone są ich osiągi, między innymi odległość (przemieszczenie środka masy), wiek (czas życia) i średnia prędkość (równa odległości dzielonej przez wiek). Zdefiniowanie ostatecznej funkcji oceny sprowadza się do ustawienia wag poszczególnych kryteriów (wagi mogą być dodatnie, ujemne lub zerowe). W ten sposób wielokryterialna ocena osobnika jest sumą ważoną wartości poszczególnych kryteriów. Przed etapem selekcji oceny osobników mogą jeszcze zostać poddane skalowaniu liniowemu lub sigma-obcinającemu [9].

Głównym celem dotychczasowych eksperymentów były ewolucje ukierunkowane na prędkość. W praktyce po utworzeniu organizmu mają miejsce oscylacje, które powodują ruch środka masy. Dlatego też ruchy stworzeń nie są mierzone od momentu urodzenia, ale od momentu, kiedy organizm staje się stabilny (nieruchomy). Zaliczanie początkowych oscylacji jako zdolności do poruszania się danego stworzenia byłoby niesprawiedliwe, bowiem nie są one jego zasługą.

#### IV. REZULTATY EKSPERYMENTÓW

Dotychczasowe eksperymenty ewolucyjne dotyczyły głównie ewolucji ukierunkowanych, w których dopasowanie odpowiadało prędkości (na lądzie i w wodzie). Powstało wiele chodzących i pływających stworzeń [11]. Zwykle pierwszym pomysłem na poruszanie się jest pojedynczy neuron podłączony rekurencyjnie do siebie i kontrolujący mięsień zginający. Ponieważ takie stworzenia nie wiedzą nic o środowisku, w którym żyją, ich ruch zależy jedynie od początkowego, losowego stanu neuronu. Takie techniki poruszania się są obecne w genotypach również w późniejszych fazach ewolucji – nawet wtedy, gdy ewolucja odkryła już efektywniejsze metody poruszania się – jako relikty przeszłości. Lepsze metody poruszania się na ziemi to chaotyczne odpychanie się (kiedy zmienny sygnał pochodzi od zmysłu równowagi lub dotyku), ruch pseudookresowy, który dalej staje się coraz bardziej celowy – podczas gdy zbędne elementy zostają usunięte z genotypu (rys. 1). W jednym z eksperymentów odnóże zostało podwojone podczas krzyżowania, a po dalszej ewolucji stworzenie umiało korzystać z obu odnóży, choć w różny sposób – jedno odpychało, a drugie ciągnęło [11]. Zaobserwowano również przypadek, kiedy odnóże jest równocześnie zginane i obracane, co jest efektywniejszą metodą odpychania się od ziemi. U pewnego stworzenia neuron wykorzystywał stan nasycenia, by produkować opóźnione sygnały, co stanowi prosty przypadek pamięci krótkoterminowej. Bardziej złożone organizmy, które wyewoluowały, nie poddawały się już tak łatwo analizie ze względu na ich znaczny stopień skomplikowania.



**Rys. 1.** Kilka faz ruchu prostego stworzenia z jedną kończyną odpychającą. Sieć neuronowa składa się z jednego neuronu. Kontakt receptora dotyku z podłożem powoduje zgięcie kończyny pod siebie, brak kontaktu – jej wyprostowanie.

Kiedy nie istnieje wśród osobników dobry sposób na poruszanie się, występuje tendencja do wypróbowywania wielu zróżnicowanych pomysłów. Stworzenia z silniejszymi mięśniami, lepszym sterowaniem i wieloma odnóżami (które pomagają zachować stabilność) przeżywają. Ewolucja promuje siłę mięśni oraz powoduje, że kończyny odpychające/ciągnące stają się dłuższe i bardziej szorstkie. Największe innowacje są zwykle odkrywane pojedynczo i zachowywane w trakcie ewolucji tak długo, aż nie zostaną zastąpione lepszymi rozwiązaniami.

Podczas eksperymentów ewolucyjnych wielokrotnie zmuszeni byliśmy do modyfikacji reguł symulacji i poprawiania błędów. Ewolucja okazała się dobrą metodą przeszukiwania przestrzeni rozwiązań (organizmów), będąc zdolną do znajdowania dobrych osobników niezależnie od ich racjonalności i poprawności. Kilka uproszczeń, które zastosowaliśmy, doprowadziło do nierealistycznych zachowań: przede wszystkim charakterystyki mięśni były zbyt wyidealizowane – mięśnie reagowały natychmiastowo na sygnał neuronu sterującego.



Optymalną metodą poruszania się były więc oscylacje ciała uzyskiwane za pomocą małych, bardzo szybkich ruchów kończyn z mięśniami, dlatego należało ograniczyć gwałtowne ruchy mięśni. Innym błędem odkrytym i bezwzględnie wykorzystanym przez ewolucję była sytuacja, w której pływające stworzenia mogły uzyskać dodatkową prędkość dzięki bardzo szybkim obrotom segmentów w wodzie.

Wystąpiło kilka innych błędów projektowych, które powodowały, że notowane straty energii były mniejsze od faktycznych. Te błędy w symulatorze zostały prędzej czy później odkryte przez ewolucję, użyte w symulowanych organizmach, a następnie udoskonalone i wykorzystane w najwyższym możliwym stopniu.

## **V. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH PRAC**

Większość dotychczasowych eksperymentów dotyczyła ewoluowania wirtualnych stworzeń poruszających się jak najszybciej. Rezultaty wskazują, że istotne wynalazki metod poruszania się dominują populacje podlegające ewolucji, lecz kiedy populacja składa się z podobnych osobników (i trudno znaleźć łatwe usprawnienia), proces ewolucyjny powoduje duże zróżnicowanie organizmów w poszukiwaniu nowych technik ruchu. Zaobserwowano, że w przyjętym modelu trudno jest wyewoluować generator wolnozmienny, być może dlatego, że nie może on powstać na drodze niewielkich ulepszeń. Nasze eksperymenty potwierdzają fakt, że algorytm ewolucyjny jest w stanie przeszukiwać przestrzeń rozwiązań w sposób globalny – był on dobrym narzędziem wynajdującym błędy modelu i wykorzystującym je, stanowił więc pomoc dla twórców reguł symulacji i ewolucji.

Obecnie możliwe jest uruchomienie ewolucji swobodnej, jednakże istnieje kilka ograniczeń, z których głównym jest reprezentacja genotypu. Nie pozwala ona na łatwą ewolucję złożonych struktur organizmów: większość z nich ma niewiele rozgałęzień, co uniemożliwia wykorzystanie w pełni możliwości symulatora i tworzenie złożonych konstrukcji. Przyszłe prace będą zatem dotyczyły przede wszystkim ulepszonej reprezentacji genotypu.

W nowej reprezentacji, zamiast kodować strukturę fizyczną i sieć neuronową liniowo, opisywany będzie zbiór elementów składowych organizmu (segmentów, neuronów). Te elementy będą dalej łączone według ich podobieństwa i wzajemnego dopasowania. Takie podejście jest analogiczne do procesu budowania białek, kiedy ciąg aminokwasów tworzy wiązania w zależności od ich orientacji przestrzennej, dając w rezultacie takie same cząsteczki. Dzieje się tak pomimo faktu, że nie istnieje w genotypie zapisana wprost informacja o tym, które atomy powinny być połączone. Opisana nowa reprezentacja genotypu może pozwolić na ominięcie obecnych ograniczeń, mamy też nadzieję, że przeszukiwanie przestrzeni organizmów stanie się jeszcze bardziej efektywne. Wstępne eksperymenty pokazują, że doprowadzi to do tworzenia się bardziej zróżnicowanych konstrukcji i pozwoli na ich prostszą modyfikację przez operatory genetyczne.

Przyszłe badania będą dotyczyły również zdefiniowania lepszej miary podobieństwa, ulepszania reguł symulacji i ich parametrów, a także symulacji swobodnych. Być może zostaną wprowadzone dodatkowe receptory i bardziej złożone kryteria dla ewolucji ukierunkowanych. Mamy nadzieję, że przyszły rozwój i dalsze eksperymenty z ewolucjami spontanicznymi w trójwymiarowym modelu symulacyjnym pozwolą na tworzenie się organizmów o wysoce złożonych, realistycznych zachowaniach.

## **PODZIĘKOWANIA**

Praca ta jest finansowana z projektu badawczego KBN nr 8T11C 013 13.

## LITERATURA

1. Adami, C., Brown, C. T., Evolutionary learning in the 2D artificial life system "Avida". W: Rodney A. Brooks and Pattie Maes (eds.), *Artificial Life IV*. MIT Press/Bradford Books, 1994.
2. Balkenius, Ch., *Natural Intelligence in Artificial Creatures*, Ph. D. Thesis, Lund University Cognitive Studies, 1995.
3. Balkenius, Ch., BERRY III: An Interactive Simulator for Artificial Creatures, 1994.
4. Cruse, H., Kindermann, T., Schumm, M., Dean, J., Schmitz, J., Walknet – a biologically inspired network to control six-legged walking. W: *Neural Networks* **11** (1998) 1435-1447, Elsevier Science Ltd.
5. Cymbalyuk, G. S., Borisyuk, R. M., Mueller-Wilm U., Cruse, H., Oscillatory network controlling six-legged locomotion. Optimization of model parameters. W: *Neural Networks* **11** (1998) 1449-1460, Elsevier Science Ltd.
6. Dawkins, R., *Wspinaczka na szczyt nieprawdopodobieństwa*, Prószyński i S-ka, Warszawa, 1998.
7. Ficici, S. G., Pollack, J. B., Coevolving communicative behavior in a linear pursuer-evader game. W: *Proc. Fifth International Conference of the Society for Adaptive Behavior*, Pfeifer, Blumberg, Kobayashi (eds.), Cambridge: MIT Press, 1998.
8. Ficici, S. G., Pollack, J. B., Challenges in coevolutionary learning: arms-race dynamics, open-endedness, and mediocre stable states. W: *Proc. Sixth International Conference on Artificial Life*, Adami, Belew, Kitano, Talor (eds.), Cambridge: MIT Press, 1998.
9. Goldberg, D. E.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, WNT, Warszawa, 1995.
10. Komosiński, M., Ulatowski, Sz., Framsticks – Artificial Life. W: C. Nédellec, C. Rouveirol (eds.), *ECML '98 Demonstration and Poster Papers*, Chemnitzer Informatik-Berichte, Chemnitz, 1998, 7-9.
11. Komosiński, M., Ulatowski, Sz., Witryna internetowa projektu **Framsticks**, <http://www.frams.poznan.pl/>
12. Langton, Ch., *Journal of Artificial Life*, Volume 1, Number 1/2, MIT Press, Fall 1993/Winter 1994.
13. Maes, P., Darrel, T., Blumberg, B., Pentland, A., The ALIVE system: full-body interaction with autonomous agents. W: *Proc. of the Computer Animation '95 Conference*, Geneva, Switzerland, IEEE-Press, 1995.
14. Maes, P., Artificial Life meets Entertainment: Interacting with Lifelike Autonomous Agents. W: *Special Issue on New Horizons of Commercial and Industrial AI* **38**, 11 (1995) 108-114, Communications of the ACM, ACM Press.
15. Michalewicz, Z.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, WNT, Warszawa, 1996.
16. Ray, T. S., An approach to the synthesis of life, *Artificial Life II*, Langton C. G. et al. (eds.), Addison-Wesley, 1992, 371-401.
17. Ray, T. S., An evolutionary approach to synthetic biology: Zen and the art of creating life. W: *Artificial Life I*, 1994, 195-226.
18. Reynolds, C., Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. W: *Computer Graphics: Proceedings of SIGGRAPH '87*, 21 (4), ACM Press, 1987.
19. Sims, K., Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition. W: R. Brooks, P. Maes (eds.), *Artificial Life IV Proceedings*, MIT Press, 1994, 28-39.
20. Terzopoulos, D. et al., Artificial fishes with autonomous locomotion, perception, behavior and learning, in a physical world. W: *Proc. of the Artificial Life IV Workshop*, Pattie Maes and Rod Brooks (eds.), MIT Press, 1994.