

Marcin Chumieja
Politechnika Wrocławska
Wydział Informatyki i Zarządzania
kierunek informatyka - III r
nr indeksu: 87012

Wrocław, dn. 7.06.2000

Algorytmy genetyczne

seminarium

temat: Ewolucyjny kształt, ruch i sztuka.

1. Wprowadzenie	3
2. Ewolucyjna grafika	3
2.1 Czym jest grafika ewolucyjna	3
2.2 Grafika algorytmiczna i proceduralna	4
2.3 Stosowanie ewolucji w grafice proceduralnej	4
2.4 Szczegóły techniczne	5
2.5 Grafika ewolucyjna jako forma sztuki	5
2.6 Kto jest prawdziwym artystą?	6
2.7 Podział pracy w ewolucji interaktywnej	7
2.8 Różnice pomiędzy automatyczną i interaktywną ewolucją	7
2.9 Złożoność kontra prędkość	7
2.10 Fenotypy	8
2.11 Genotypy	8
2.12 Formy ekspresji	9
2.12.1 Ekspresja atrybutowa	9
2.12.2 Ekspresja proceduralna	10
2.12.3 Metody mieszane	10
2.13 Krzyżowanie i reprodukcja płciowa	10
2.14 Mutacja	11
2.15 Stopień mutacji	11
2.16 Selekcja	11
2.17 Selekcja automatyczna	12
2.18 Koewoluujące systemy generatorów wzorów i oceniaczy	13
2.19 Wizja na przyszłość	13
3. Ewolucja ruchu	14
3.1 Seksualni Pływacy - Jeffrey Ventrella	14
3.2 Zarys systemu	14
3.3 Autonomiczna reprodukcja	14
3.4 Animacja w czasie rzeczywistym	15
3.5 Świat	15
3.6 Pływacy	16
3.7 Budowa	16
3.8 Preferencje	17
3.9 Kojarzenie się	17
3.10 Symulacja	17
3.11 Rezultaty	19
4. Bibliografia	20

Wprowadzenie.

Temat seminarium składał się z kilku części: kształt, ruch, obraz i sztuka.

W trakcie poszukiwań w internecie zgromadziłem wiele dokumentów z mnóstwem zdjęć. Po zapoznaniu się z zawartością tych materiałów, uznałem, że najciekawszą częścią będzie przedstawienie ewolucyjnej grafiki, która pozwala użytkownikowi tworzyć obrazy w taki sam sposób, w jaki powstają zwierzęta i rośliny. Spróbuję też wywołać dyskusję na temat ewolucyjnej sztuki i „ewolucyjnych artystów”.

W przypadku ewolucji ruchu większość materiałów była spokrewniona ze sztucznym życiem. Dlatego postanowiłem przedstawić tutaj tylko zarys jednego takiego systemu („Sexual Swimmers” [5]), w którym podczas ewolucji nie występuje funkcja oceny.

Na dyskietce z dokumentem w postaci elektronicznej zamieściłem pliki z obrazami prezentowanymi podczas seminarium na foliach.

Zdjęcia te będą też dostępne w sieci pod adresem <http://sun10.ci.pwr.wroc.pl/~chumieja>.

Ewolucyjna grafika.

Czym jest grafika ewolucyjna.

W naturze, ewolucji przewodzi darwinowski cykl reprodukcji, losowa mutacja, i przeżycie najbardziej odpowiednich dorosłych organizmów poprzez konkurencję i zdolność ponownego rozmnożenia się. Dobór naturalny produkuje ewolucję rozmaitych gatunków dostosowywanych do ich otoczeń i siebie nawzajem.

Grafika ewolucyjna pozwala użytkownikowi kształtować komputerowe obrazy, stosując zorientowane na użytkownika metody selekcji grafik, podobnie jak w przyrodzie ma miejsce naturalna selekcja żywych organizmów. Tak jak biologiczna ewolucja tworzy rośliny i zwierzęta dobrze przystosowane do swoich środowisk, tak programy ewolucyjne tworzą coraz bardziej idealne obrazy.

Ewolucyjna sztuka (nazywana w skrócie evo-art) została zapoczątkowana przez Richarda Dawkinsa, którego eksperymenty z hodowaniem prostych form 2D („Biomorphs”- na Apple Macintosh) dały pierwsze wyobrażenie o wynikach połączenia ewolucji i ludzkiego oka.

Proces jest prosty: program ewolucyjnej sztuki generuje kilka losowych genotypów (stringi, drzewa lub sieci matematycznych wyrażeń), o istnieniu i budowie których użytkownik nic nie wie, tak jak pierwsi hodowcy psów byli w niewiedzy na temat DNA. Wszystko co użytkownik widzi są to fenotypy - obrazy, które są fizycznym ucieleśnieniem odizolowanego szyfru. Użytkownik wybiera najlepszy lub przydziela im oceny według swoich preferencji, a komputer robi całą resztę - losowo zmieniając i w pewnym sensie łącząc genomy faworyzowanych obrazów, aby utworzyć nową galerię fenotypów bardziej dostosowanych do gustu użytkownika. W ten sposób wrażliwość estetyczna tworzy mechanizm selekcji, mnożący obrazy które są bardziej przyjemne dla oka. Proces jest powtarzany do momentu osiągnięcia satysfakcjonującego efektu.

Typ tworzonego obrazu zależy od używanego systemu. Niektóre programy tworzą abstrakcyjne, kolorowe obrazy lub trójwymiarowe formy, inne tworzą figury zbudowane z odcinków i krzywych, niemal żywe rośliny itp. Bez względu na to, do tworzenia jakiego rodzaju obrazów zaprogramowany został system, bogactwo form wynika z zaskakująco dużej liczby możliwości wariacji, kombinacji, które mogą być stworzone w ramach systemu.

Grafika algorytmiczna i proceduralna.

Aby móc stosować metody ewolucyjne na użytek grafiki komputerowej, komputer musi dysponować odpowiednimi sposobami generowania obrazu. Grafika algorytmiczna i proceduralna przedstawia sposoby tworzenia obrazu krok po kroku, zgodnie z algorytmem, pozwalając na to, aby detale zamiast przez użytkownika, były określane na zasadzie rekursji, fraktali lub metod stochastycznych. Tworzone w ten sposób dzieła powstają na podstawie relatywnie małej ilości danych. Metody grafiki proceduralnej zostały rozwinięte do tworzenia wielu rodzajów obrazów.

Grafika proceduralna ma zarówno zalety jak i wady w porównaniu z bardziej bezpośrednimi sposobami komputerowego tworzenia obrazów. Pozwala na większą złożoność obrazów przy mniejszej liczbie danych wejściowych i ma odpowiedni potencjał, aby umożliwić jeszcze większe pogłębienie złożoności niż byłoby to możliwe gdyby każdy szczegół miał być opisywany, projektowany i implementowany z osobna.

Jednakże stworzenie odpowiedniego algorytmu może być trudne i często sprowadza się do metody prób i błędów. Często też pogłębienie złożoności, może sprawić, że trudno jest przewidzieć skutki nawet niewielkich zmian parametrów, czyniąc prawdziwym wyzwaniem znalezienie odpowiedniego obrazu. O ile grafika algorytmiczna oferuje większe bogactwo i złożoność przy jednoczesnym oszczędzaniu użytkownikowi pracy nad określeniem każdego detalu, o tyle jednocześnie sprawia, że obraz podlega mniejszej kontroli użytkownika. Grafika ewolucyjna pomaga rozwiązywać ten problem.

Stosowanie ewolucji w grafice proceduralnej.

Stosując techniki ewolucyjne w grafice proceduralnej użytkownik w pośredni sposób może odzyskać kontrolę nad obrazem. Procedury ewolucyjne zastępują metodę prób i błędów kierowaną przypadkowością. Użytkownik steruje ewolucją wybierając przypadkowe wariacje, co uważane jest za polepszenie populacji. Komputer mierzy się ze złożonymi zadaniami obliczeniowymi mając do czynienia z wieloma parametrami, danymi i informacjami proceduralnymi, dzięki czemu użytkownik jest wolny od głównej troski jaką jest najprawdopodobniej wygląd końcowy obrazu. Użytkownik traci bezpośrednią kontrolę nad systemem, za to jej sprawowanie staje się bardziej wygodne. Jednocześnie wraz ze wzrostem skomplikowania systemu, efektywna implementacja kontroli bezpośredniej staje się znacznie trudniejsza.

Są także inne zalety w odsunięciu użytkownika od określania szczegółów systemu proceduralnego. Oszczędza to czas i energię, który zostałby zmarnowany na próby zrozumienia wielu komend i parametrów. Pozwala to użytkownikowi na tworzenie obrazów i animacji, których olbrzymia złożoność byłaby trudna lub wręcz niemożliwa do ogarnięcia przez człowieka. Pozwala także korzystać z mocy grafiki proceduralnej ludziom, którzy w przeciwnym razie nie mieliby odpowiedniej wiedzy, aby jej używać.

Algorytmy ewolucyjne są używane na potrzeby grafiki proceduralnej, zarówno do modelowania danych wejściowych, jak i samych algorytmów tworzenia obrazu. Funkcje podstawowe systemu ewolucyjnego zakreślają granice systemu ewolucyjnego, granice tego co jest możliwe.

Jeffrey Ventrella: „Tak jak nasze ludzkie DNA nie może wyprodukować innego zwierzęcia czy rośliny tak program ewolucyjnej sztuki nie może stworzyć nieskończonego zakresu produktów. Są zawsze limity i ograniczenia do których formy mogą dążyć. Nieskończoność nie jest możliwa, ale nie jest to wcale takie ważne. Ważne jest natomiast wielkie zróżnicowanie wśród skończonej przestrzeni możliwości i ścieżek wewnątrz tej przestrzeni ułatwiających eksplorację i odkrywanie.”

Większa przestrzeń systemu zmniejsza liczbę szybko uzyskiwanych rezultatów.

Szczegóły techniczne.

Dla przykładu aktualny system Stevena Rooke'a [2] używa drzewiastej struktury genomu, gdzie każdy piksel jest wynikiem tak samo rozwijanego programu działającego w innym obszarze przestrzeni, która dla kilku funkcji jest przestrzenią rzeczywistą, dla innych zespoloną.

Obraz „In the Beginning” (załączony na dyskietce) miał w sumie 427 nukleotydów, węzłów drzewa:

- 271 funkcji (węzły wewnętrzne drzewa):
 - 84 arytmetycznych,
 - 7 logicznych,
 - 27 wykładniczych,
 - 56 trygonometrycznych,
 - Deterministyczny chaos w zespolonej przestrzeni:
 - 12 2D Mandelbrot/Julia,
 - 32 zmodyfikowane Julia,
 - 21 4D Quaternion Julia,
 - 11 specjalizowane kombinacje,
 - 21 generatorów losowych.
- Zakończenia (liście drzewa):
 - 129 współrzędne x y,
 - 6 stałych czasowych,
 - 21 wystąpień liczby Pi.

Dodatkowo, każda ewolucja wymaga tuzinów parametrów określających początkowe warunki. Kilka z nich może być dobieranych losowo i umieszczanych automatycznie przy rozpoczynaniu, inne muszą być umieszczane ręcznie. Pewne zakresy początkowych warunków dają dobre efekty w funkcjach chaotycznych osadzanych w genetycznym systemie sztuki, inne natomiast nie, tworząc nisze estetycznego przyciągania w ewolucyjnej hiperprzestrzeni sztuki.

Steven Rooke: „Ewolucjonowanie obrazów od ‘pierwotnej zupy’ zabiera tak dużo czasu (setki pokoleń), że dla ostatnich dwu lat obsiewałem swoje nowe ewolucje genami od już wygenerowanych ulubieńców. Sto i tysiące pokoleń później, genetyczna biblioteka sama staje się najbardziej ważną i wartościową częścią ewolucyjnego systemu sztuki, nawet bardziej niż obszerna biblioteka oprogramowania.”

Grafika ewolucyjna jako forma sztuki.

Grafika ewolucyjna może być użyteczna jako narzędzie techniczne, pomagając użytkownikowi w nawigacji olbrzymią ilością parametrów i algorytmów. Jednak może być także traktowana, jako forma sztuki sama w sobie. Zarówno dzięki bogactwu wariantów jak i łatwości podejmowania prób pozwala na o wiele szersze eksperymenty artystyczne niż statyczne formy sztuki. Kolejną unikatową cechą sztuki ewolucyjnej jest dopuszczenie wielu użytkowników do udziału w tym samym akcie tworzenia dającym tym samym inne rezultaty.

Niektórzy badacze opisują grafikę ewolucyjną jako współpracę z komputerem, lecz jest to bardziej współpraca z siłą przypadku. Tak jak w każdej pracy zespołowej, efekty są odmienne od tych, jakie byłyby tworzone przez osobę działającą w pojedynkę. Wprowadzenie przypadkowości do procesu tworzenia nadaje mu świeżości, podczas gdy celowa kontrola oferuje wyjątkową okazję do wyrażenia swojej kreatywności. Można by się spierać, czy użytkownik, który nie sprawuje bezpośredniej kontroli nad obrazem, jest zaangażowany twórczo. Jednak ewolucją sterują osobiste odczucia estetyczne każdego użytkownika i to sprawia, że każde dzieło tworzone w ten sposób jest niepowtarzalne.

Kolejnym punktem zainteresowania sztuki systemami grafiki ewolucyjnej jest ich ciągła zmienność i fakt, że żaden obraz nie musi być uznawany za końcowy i może być użyty jako podstawa do tworzenia kolejnych dzieł. Obiekt fizyczny, obraz, rzeźba, czy budynek, jest tworzony jako statyczny i niezmienny. Obiekty żywe, pojawiające się w naturze podlegają zmianom, jednak zachodzą one zbyt wolno, aby mogły być przez nas odbierane. Obrazy tworzone przez sztuczną ewolucję żyją własnym życiem. Ponadto wychodząc od jednego obrazu, możemy pójść różnymi drogami, uzyskując zupełnie odmienne efekty. Każde dzieło jest pełne nowych możliwości.

Interakcja nie musi być ograniczona do jednego użytkownika. Jest kilka sposobów, aby umożliwić uczestnictwo w ewolucji większej ilości użytkowników. Dwóch lub więcej użytkowników może zaczynać tworzenie obrazów z tego samego punktu wyjścia, w obrębie tego samego systemu, i kształtować oryginalne obrazy. Użytkownicy mogą współpracować, oceniając na zmianę przystosowanie kolejnych generacji. Wreszcie wielu użytkowników może brać udział w tworzeniu jednego pokolenia, poprzez ocenianie pewnego zestawu obrazów, podczas, gdy komputer operuje tymi informacjami dla określenia stopnia przystosowania każdego obrazu.

Karl Sims w 1993 roku stworzył system („Genetic Images” [3]), który był wystawiany między innymi w Centre Georges Pompidou w Paryżu, Ars Electronica w Linz oraz na festiwalu interaktywnych mediów w Los Angeles. W tej ekspozycji zwiedzający mogli ewoluować abstrakcyjne obrazy. Superkomputer (Connection Machine z 32768 procesorami) generował obrazy i wyświetlał je na 16 monitorach. Przed monitorami znajdowały się podesty z sensorami. Zwiedzający stawał na podeście przed monitorem wyświetlającym obraz, który najbardziej mu się podobał. W ten sposób człowiek wybierał obraz, który miał być wykorzystany do stworzenia następnego pokolenia obrazów.

Kto jest prawdziwym artystą?

Ludzie zajmujący się ewolucyjną sztuką rzucają wyzwanie tradycyjnemu pojmowaniu pojęcia sztuki. Oni tak samo dobrze znają się na języku matematyki jak na artystycznych pojęciach linii, koloru i formy. Tworzą oni raczej pod względem eksploracji i odkrywania niż inspiracji czy kreatywności. A jeśli chodzi o ich pracę, to są oni symbiotyczni z maszyną. Ani sam komputer ani sam artysta nie mógłby stworzyć tego co mogą dokonać wspólnie.

Jeffrey Ventrella - autor interaktywnego programu evo-art Absolut Vodka [4] (aktualnie nieaktywnego) wierzy, że jest nim twórca oprogramowania, którego nazywa meta-artystą.

Mówi: „I twórca i użytkownik programu evo-art może być postrzegany jako artysta, ale obaj odgrywają różne role: twórca narzędzia tworzy genetyczną przestrzeń, w której wszystko się odbywa. Użytkownik natomiast wykorzystuje kreatywność i estetyczną ocenę w tej przestrzeni. Dlatego uważam, że najważniejszym artystą jest programista systemu evo-art.”

Rolą meta-artysty jest wygrodenie sekcji wśród galerii wszystkich możliwych obrazów kierując użytkownika do potencjalnych rozwiązań i owocnych wycieczek.

Pyta się on: „Gdy Picasso i Braque wymyślili kubizm, czy korzystali oni z ‘aplikacji’ wyprodukowanych przez kogoś innego? Nie. Oni stworzyli metodę reprezentacji rzeczywistości z niczego i stali się użytkownikami tej metody.”

Tak jak wielu ewolucyjnych artystów, Steven Rooke jest i meta-artystą i artystą: „Moja biblioteka genów form w obrazach rozrasta się z każdym nowym uruchomieniem i dostarcza ziarna dla następnych, pomyślnych procesów. Po latach ciągłej pracy nad tym projektem mój bank genów jest bardziej wartościowy dla mojej dalszej pracy niż system, który napisałem do jego stworzenia.”

Programy ewolucyjnej sztuki często mogą być mocno specjalizowane. Na Leiden University w Holandii, Jano van Hemert i Gusz Eiben stosowali garść reguł (używaj tylko białego, czerwonego, niebieskiego i żółtego dla planów kolorowych; tylko prostych czarnych linii, które zawsze kończą się prostopadle do linii bądź ramki) w celu utworzenia galerii obrazów w stylu Pieter Mondriaan. Van

Hemert nazywa siebie „najgorszym fałszerzem”, ale jego program daje doskonały przykład jak system evo-art może być użyty jako model szczególnego artystycznego podejścia, dostarczając użytkownikom pewien stopień wolności w zmienianiu parametrów modelu. „Charakter genetycznych obrazów jest częściowo wyznaczony przez bazowe funkcje, które dostarczają słownictwa ekspresji dostępnego systemowi”.

Podział pracy w ewolucji interaktywnej.

Wprowadzenie elementów interaktywnych do sztucznej ewolucji pozwala na podział pracy między użytkownika a komputer, oparty na ich cechach. Człowiek nie potrafi, tak dobrze i szybko jak komputer, przetwarzać informacji, dokonywać obliczeń, operować złożonymi danymi, czy radzić sobie ze skomplikowanymi instrukcjami, natomiast komputery nie nudzą się długotrwałymi i męczącymi zadaniami. Jednak człowiek potrafi radzić sobie z problemami, których nie da się ująć w twarde kryteria i konkretne warunki. Dysponuje intuicją i poczuciem estetyki itp., które niemożliwe są do przekazania programowi komputerowemu. Człowiek dysponuje także umiejętnością szybkiego kojarzenia wielu, pozornie nie związanych ze sobą czynników.

Jak mówi Steven Rooke: „W tym procesie jest coś przykuwającego uwagę. Czuje się, że obrazy próbują wydrzeć się ze swojej rzeczywistości do świata rzeczywistego. Czasami po kilku dniach - dziesiątkach pokoleń z setką osobników w populacji, gdy nagle! pojawia się coś znajomego spoglądającego na mnie z ekranu komputera.”

Interaktywna selekcja jest znacznie wolniejsza niż zaimplementowana funkcja sprawności, jednakże pozwala na zastosowanie sztucznej ewolucji w obszarach, które w innym przypadku nie byłyby do tego odpowiednie, takich jak poczucie estetyki.

Różnice pomiędzy automatyczną i interaktywną ewolucją.

Klasyczne teorie i strategie genetyczne, są efektywne dla tradycyjnych obliczeń ewolucyjnych. Te ostatnie jednak znacznie różnią się od metod stosowanych w interaktywnej grafice ewolucyjnej. Wartość funkcji sprawności są określane przez człowieka, a to narzuca pewne ograniczenia. Każde pokolenie musi zawierać znacznie mniej osobników. Także potrzeby systemów interaktywnych są różne niż w tradycyjnych systemach obliczeń ewolucyjnych. Mniejsza liczba pokoleń o mniejszej liczebności oznacza, że każde pokolenie musi się lepiej przystosowywać. Także wiele z teoretycznych zasad obliczeń ewolucyjnych jest efektywnych tylko w zastosowaniu dla wielu dużych populacji, co oznacza, że w systemach interaktywnych muszą zostać zastąpione innymi zasadami.

Złożoność kontra prędkość.

Grafika ewolucyjna doskonale radzi sobie ze złożonością tworzenia komputerowych dzieł. Niestety ze względu na skończoność ludzkiej cierpliwości interaktywne systemy ewolucyjne, uważane są za najlepsze, gdy tworzą w rozsądnym czasie. Złożone obrazy powstają wolno, a systemy grafiki ewolucyjnej muszą tworzyć co najmniej kilka obrazów w każdym pokoleniu. Niekiedy obrazy są na tyle proste, że nie stanowi to problemu, ale często kryteria złożoności i prędkości są ze sobą sprzeczne.

Im bardziej rozbudowane, złożone są zbiory podstawowych funkcji dostępnych w systemie tym trudniejsze staje się wyewoluowanie odpowiedniego obrazu: większa staje się przestrzeń i wydłuża się czas jej przeszukiwania. Wzrasta także czas potrzebny na wygenerowanie fenotypu.

W takich sytuacjach próbuje się optymalizować prędkość. Niektóre systemy eliminują obrazy, których tworzenie zajmuje najwięcej czasu, zanim zostaną narysowane. Jednak dla złożonych obrazów prędkość jest ciągle problemem. Niektóre z wolniejszych systemów tworzą nową generację nawet przez kilka godzin. W porównaniu z metodą prób i błędów, czas jaki jest potrzebny na tworzenie

każdego nowego pokolenia jest wprawdzie znacznie dłuższy, ale też wykorzystywany bardziej efektywnie.

Problem ten zaabsorbował Kena Musgrave, który jak tak jak Rooke był pod wpływem wcześniejszych prac Karla Simsa [3] z genetycznymi obrazami. „Byłem zafascynowany ideą genetycznych tekstur od czasu wizyty u Karla Simsa i zabawy z jego oryginalnym oprogramowaniem na 16000 procesorowej Connection Machine. Miałem swoje własne pomysły jak tworzyć obrazy z naturalistycznym charakterem i chciałem zobaczyć, czy byłoby to możliwe na dzisiejszych laptopach”. Gdy Musgrave dołączył dwa lata temu do MetaCreations dostał wolną rękę do prowadzenia badań w kierunku swoich zainteresowań. Wynikiem był Dr Mutatis - ewolucyjne narzędzie pod Macintosha. „Pod względem liczby pokoleń ewolucja obrazów jest szybka. Jednak pod względem czasu procesora trwa wciąż zbyt długo, aby wytworzyć interesujący obraz, a przecież ten typ oprogramowania musi być wysoko interaktywny. Wciąż potrzebujemy poprawy w szybkości, aby otrzymać rzeczywiście bogate i interesujące genetyczne obrazy na popularnych komputerach domowych. Ale już niedługo dojdziemy do tego”.

Fenotypy.

Każdy obraz stworzony przez program grafiki ewolucyjnej jest fenotypem pewnego systemu. Istnieje wiele różnych typów obrazów kreowanych w ten sposób:

- 2D i 3D drzewa / rośliny,
- 2D czarno-białe,
- 2D kolorowe,
- Rzeźba 3D,
- Animacja,
- inne.

Genotypy.

Najbardziej fundamentalną częścią sztucznego systemu ewolucji jest genotyp, w którym utrzymywane i kodowane są wszystkie informacje niezbędne do stworzenia fenotypu. Genomy obliczeniowe mogą być podzielone na cztery kategorie ze względu na strukturę danych:

- ciąg ustalonej długości,
- ciąg dynamiczny,
- drzewo,
- graf skierowany.

Najprostszym jest genom o strukturze ciągu ustalonej długości, który ma charakter ciągu numerycznych, binarnych lub decymalnych parametrów o wartościach całkowitych lub zmiennopozycyjnych. Opierają się one na znanym z natury chromosomie. Każdy kawałek informacji w genotypie jest nazywany genem lub detektorem. Informacja przechowywana w genie jest uzależniona od jego wartości, a jego lokalizacja w chromosomie nazywana jest locusem. Locus jest niezależny od wartości genu, który identyfikuje, ale może mieć znaczenie w niektórych formach krzyżowania i mutacji. Najpopularniejszą reprezentacją w tradycyjnych algorytmach genetycznych jest reprezentacja binarna. Pozwala ona na łatwe wartościowanie genów, a także na tworzenie nawet bardzo dużej liczby kombinacji. Jednak niektóre metody mutacji i krzyżowania zyskują przy wykorzystaniu reprezentacji decymalnej. Umożliwia ona zawarcie większej liczby informacji w każdym genie.

Kolejną kategorię stanowią liniowe genomy o dynamicznej długości. Stanowią one zespół liniowo połączonych węzłów, które mogą zawierać cokolwiek czego tylko zażyczy sobie projektant. Liczba i porządek tych węzłów w obrębie genotypu może pod wpływem ewolucji zmieniać się. Konkretny typ

węzła wykorzystywany w genomie może być obecny w jednym genotypie i nie występować w innym. Jedyne ograniczenia co do wielkości i struktury genotypów wynikają tylko ze względów praktycznych. Ten typ genomów używany jest przeważnie do przechowywania list i punktów obrazu, ciągów procedur wykonywanych na obrazie: iteracyjnych lub rekursywnych funkcji graficznych.

Obie powyższe struktury genomów ograniczone są ich linearnym formatem. Struktury drzewiaste pozwalają na większą złożoność. Co prawda każdy węzeł ma w dalszym ciągu tylko jeden węzeł rodzica nad sobą, ale może mieć dwoje lub więcej potomków. Pozwala to na przechowywanie zagnieżdżonych i hierarchicznych struktur w obrębie genomu.

Najbardziej elastycznym wśród typów genotypów są te, które wykorzystują struktury grafów skierowanych. Ich przewaga polega na tym, że każdy węzeł może mieć nie tylko wielu potomków, ale także wielu rodziców, a połączenia między węzłami pozwalają na przykład na sprzężenia zwrotne. Ta metoda jest jednak najbardziej skomplikowana. Duży wkład w jej rozwój włożył Karl Sims przy tworzeniu wirtualnych stworzonek („Evolved Virtual Creatures” [3]).

Formy ekspresji.

W genotypach mogą być zawarte różnego rodzaju informacje: strukturalne, proceduralne, oraz łączące jedno i drugie. Oznacza to, że niektóre genotypy zawierają zestaw ustalonych parametrów używanych dalej przez algorytmy generujące obraz, inne zaś w całości lub w części są takimi algorytmami. Forma ekspresji zależy właśnie od rodzaju niesionej w ten sposób informacji.

Ekspresja atrybutowa.

Genotypy w postaci ustalonej długości ciągów liczb zawierają w sobie zestaw parametrów używanych w procedurach tworzących obraz. Istnieje wiele takich parametrycznych algorytmów, jednym z nich jest metoda używana do tworzenia graftedali. Co prawda gramatyki używane do tworzenia graftedali nie muszą być gramatykami atrybutowymi, genotypy mogą po prostu nieść takie informacje jak długość linii, kąt rozgałęzienia, czy głębokość rekursji, które niezbędne są do rysowania graftedala, ale nie mają związku z gramatyką. Z drugiej strony, gramatyki parametryczne pozwalają na większą różnorodność form.

Klasycznym zastosowaniem ewolucji parametrów graftedali jest program Richarda Dawkinsa rysujący stworzonka zwane biomorfami. Dawkins używa w nim prostej gramatyki i interpretacji w celu odkrycia wszelkich możliwości, jakie daje ten system. Geny przybierające wartości dziesiętne określają głębokość rekursji oraz długość i zakrzywienie linii na każdym etapie rekursji.

Bardziej złożona jest niedeterministyczna gramatyka atrybutowa używana przez Karla Simsa do tworzenia trójwymiarowych obrazów o tematyce botanicznej. Dwadzieścia jeden parametrów genetycznych umożliwia dziedziczenie elementów niedeterministycznych przez kolejne generacje. Każdy gen ma wartość z przedziału od 0 do 1, jest skalowany i przesuwany podczas przekształceń, tak aby końcowy parametr przybrał wartości wygodne do tworzenia obrazu. Dla osiągnięcia większej wrażliwości na niskie wartości, niektóre geny są podnoszone do kwadratu przed skalowaniem. Dla osiągnięcia realizmu i miękkości linie pomiędzy segmentami są prawie niezauważalne. W trakcie tworzenia każdego segmentu program bierze pod uwagę parametry genetyczne, głębokość rekursji oraz hierarchię gałęzi w obrębie danej rośliny.

Systemy oparte na parametrach mogą być wykorzystywane do tworzenia innego rodzaju obrazów.

Program Williama Lathama tworzy poskręcane formy organiczne. Rodzina tych form jest projektowana i tworzona ręcznie, a następnie wprowadzana do komputera w określonym formacie. Parametry tej reprezentacji są przekształcane w genom, poddane ewolucji, a następnie przekształcany znowu na obraz.

Caldwell i Johnston stworzyli zestaw wizerunków twarzy, używający binarnych genotypów do tworzenia portretów pamięciowych poszukiwanych przestępców. Genom jest podzielony na siedem części, z których każda reprezentuje inną część twarzy: oczy, nos, usta, brodę, uszy i czoło. Kodują one wielkość i położenie każdej części i kompozycję całości na ekranie.

Powyższe przykłady są tylko wąskim wycinkiem zastosowań tego rodzaju genomów. Wiele innych zostanie odkrytych w przyszłości, dla rozwiązania nowych problemów i realizacji nowych pomysłów. Proces tworzenia systemu ewolucyjnego tworzącego obrazy w oparciu o parametry składa się z następujących etapów: wybranie odpowiedniej metody graficznej, określenie rodzaju parametrów stosowanych w tej metodzie, a następnie reprezentacji tych parametrów (np. parametry dziesiętne mogą być przedstawiane w postaci binarnej lub dziesiętnej). Później należy określić zasady selekcji reprodukcji, itd.

Ekspresja proceduralna.

Niektóre genomy zawierają wszystkie procedury generowania obrazu w obrębie danego genotypu. Oczywiście tego rodzaju genotypy są najłatwiejsze do przedstawienia. W tych przypadkach metody tworzenia obrazu są poddawane ewolucji i nie muszą być programowane ręcznie.

Za przykład może posłużyć program Nicka Turnera „Cyberchromes”, wykorzystujący te metody do tworzenia kolorowych abstrakcji. Inne genotypy zawierają wiele procedur tworzenia obrazów, ale wciąż mocno opierają się na metodach renderowania obrazów, które nie są ujmowane w genomach. Używa się także metod, w których genotypy są specjalnymi wyrażeniami (zwykle w postaci wyrażen języka lisp), które w wyniku ewolucji mogą zawierać także parametry pierwotnie zewnętrzne wobec genotypu, np. współrzędne pikseli. Jest to zatem jakby odwrotność genomów atrybutowych. Zestawy używanych funkcji mogą być bardzo różne, zarówno pod względem rozmiaru, jak i złożoności. W każdym przypadku, zawierają one podstawowe funkcje arytmetyczne i logiczne, a niektóre również zaprojektowane specjalnie na potrzeby rozwiązania danego problemu.

W jednym z programów Karl Sims za pomocą hierarchicznych genomów typu „lisp” tworzy abstrakcyjne, dwuwymiarowe, kolorowe obrazy. Wyrażenie jest iteracyjnie traktowane jako współrzędna każdego z pikseli obrazu, a po przejściu przekształceń ewolucyjnych przyjmowane jest za kolor tego punktu. Sims użył w tym programie sporego zestawu funkcji arytmetycznych, trygonometrycznych, logicznych oraz funkcji wykorzystywanych do przekształceń obrazów dwumiarowych:

+, -, *, /, mod, round, min, max, abs, exp, log, and, or, xor, sin, cos, atan, if, dissolve, hsv_to_rgb, vector, transform vector, bw_noise, color_noise, warped_bw_noise, warped_color_noise, blur, band_pass, grad_mag, grad_dir, bump, ifs, warped_ifs, warp_abs, warp_rel, warp_by_grad.

Na podstawie pracy Simsa powstały także inne programy, wykorzystujące te oraz inne funkcje, np. funkcje służące do tworzenia fraktali typu Julia.

Metody mieszane.

Powyżej zostały opisane genotypy, które zawierają wyłącznie parametry obrazów oraz które kryją w sobie całe procedury ich tworzenia. Jednak w większości przypadków wykorzystywane są genotypy leżące pomiędzy tymi dwoma skrajnymi rodzajami.

Krzyżowanie i reprodukcja płciowa.

Krzyżowanie i rozmnażanie płciowe jest sposobem na tworzenie nowych genotypów z materiału genetycznego dwóch lub więcej osobników. Pozwala to na łączenie w jednym osobniku cech będących efektem ewolucji kilku jego przodków.

Mutacja.

Mutacja jest to każda zmiana w obrębie genomu. Kiedy stosowane jest rozmnażanie bezpłciowe do tworzenia nowego genotypu z jednego rodzica, mutacja wprowadza wariację kodu genetycznego rodzica. Mutacja może być także stosowana jako modyfikacja wprowadzana po przeprowadzeniu reprodukcji płciowej, zwykle jednak w bardzo niewielkim stopniu.

Stopień mutacji.

Ważnym problemem, który musi być brany pod uwagę przy tworzeniu systemów ewolucyjnych jest wielkość mutacji. Do tej pory była mowa o wielkości mutacji w systemach, które w znacznym stopniu opierają się na rozmnażaniu płciowym. Natomiast w systemach stosujących reprodukcję bezpłciową (brak krzyżowania), jeżeli wielkość mutacji jest niewielka, zapobiega to wprowadzaniu znaczących zmian pomiędzy pokoleniami, powodując stagnację procesu ewolucji. Z drugiej strony zbyt duża mutacja sprawia, że potomkowie tylko w niewielkim stopniu, albo też wcale nie przypominają swoich przodków, co zmniejsza prawdopodobieństwo ulepszenia gatunku. Jeśli ewolucja jest kierowana bardziej przypadkiem, niż preferencjami użytkownika, nie ma powodu uważać, że powstaną obrazy o większej estetyce. Dlatego też uznano za fakt, że najkorzystniejsze są nieznaczne mutacje, a bardziej preferowane są mniejsze zmiany o większej częstotliwości.

Selekcja.

Dopasowanie danego fenotypu definiowane jest jako zdolność do przeżycia i reprodukcji. Selekcja jest zarówno procesem służącym do określenia dopasowania fenotypów, jak i narzędziem wyboru osobników, które przeżyją i dadzą początek następnemu pokoleniu. W ewolucji naturalnej oba te procesy przebiegają współbieżnie, jedne organizmy przeżywają i mają możliwość rozmnażania się, inne giną. W procesie sztucznej ewolucji procesy te mają charakter bardziej strukturalny. Dopasowanie każdego fenotypu jest określane albo przez człowieka, albo przez specjalny algorytm. Istnieje wiele różnorodnych metod, które pozwalają na oszacowanie stopnia przystosowania danego fenotypu, samodzielnie i jednoznacznie dobierających rodzica lub rodziców przyszłych pokoleń, bądź też pozostawiające problem ich oceny i doboru oddzielnym algorytmom. We wszystkich przypadkach, osobniki oceniane są na podstawie swoich fenotypów, a do reprodukcji służą ich genotypy.

Charakterystyczną cechą większości systemów ewolucyjnych służących do tworzenia obrazów jest ich interaktywność przy ocenie sprawności danego osobnika. Najczęściej używa się następujących rodzajów selekcji interaktywnej:

- Rozmnażanie bezpłciowe - użytkownik wybiera z populacji jednego z osobników na bezpłciowego rodzica następnej generacji. Ponieważ mamy tu do czynienia z tylko jednym rodzicem, jedyną formą przekształceń kodu genetycznego są mutacje pojedynczego genomu w każdym pokoleniu. Zaletą tej formy selekcji i reprodukcji jest jej prostota w implementacji przy jednocześnie ciekawych rezultatach, jakie stwarza. Jest ona również łatwa do kontroli oraz analizy drzewa genealogicznego.
- Krzyżowanie - jest metodą w której użytkownik wybiera dwa lub więcej osobników z danej populacji, które mają zostać rodzicami kolejnego pokolenia. Informacja genetyczna jest krzyżowana między dwoma osobnikami. Rozmnażanie płciowe osobników jest bardziej nieprzewidywalne jeśli chodzi o osiągnięte w ten sposób rezultaty, jednak wciąż w rękach użytkownika spoczywa kontrola nad selekcją. W niektórych systemach rodzice mogą być dobierani nie tylko z bieżącej generacji, ale także ze zgromadzonych zbiorów osobników, których materiał genetyczny został uznany za sprawdzony i jest przechowywany.

- Skala dopasowania - najbardziej powszechną z metod selekcji w grafice ewolucyjnej jest stosowanie stopniowanej skali oceny dopasowania. Polega ona wystawianiu przez użytkownika każdemu z oglądanych obrazów oceny zgodnej z jego odczuciami.
- Selekcja płciowa - najbardziej popularną metodą wyboru rodziców na podstawie ich oceny sprawności jest metoda zapożyczona z tradycyjnych technik algorytmów genetycznych. Osobniki z danej populacji są stochastycznie dobierane w pary. Bardziej przystosowane będą wybierane częściej na rodziców, niż te o mniejszej sprawności. Osobnik może łączyć się w pary wielokrotnie lub wcale. Po krzyżowaniu czasami stosuje się również mutacje, ale raczej w niewielkim stopniu. Stąd większość wariacji w systemie ma swe źródło wśród reprodukcji płciowej. Aby zapobiec przedwczesnej zbieżności, systemy opierające się głównie na rozmnażaniu płciowym stosowane są dla większych liczebnie populacji, niż te opierające się na mutacji. Stosuje się także metody, w których skala oceny ma charakter binarny - użytkownik określa które osobniki mają się rozmnażać, ale prawdopodobieństwo krzyżowania się jest równe dla każdego z wybranych.
- Mutacja skierowana - jest dziełem pana Lathama. Polega ona na ocenianiu każdej formy w skali od 1 do 5, informacja genetyczna każdej z nich jest używana do tworzenia jednego osobnika, tak więc nowy genotyp jest potomkiem całej populacji. Ten pojedynczy osobnik staje się bezpłciowym rodzicem następnej generacji.
- Garden selection - jest pomysłem Dawkinsa, wg którego dla oceny poszczególnych obrazów nie jest używana ani żadna funkcja sprawności, ani użytkownik. Dawkins zaproponował umieszczenie komputera na którym został uruchomiony program generujący kolorowe obrazy w ogrodzie. Komputer wyposażony jest w ekran wrażliwy na dotyk. Przyciągnięte kolorowymi obrazami pszczoły i inne owady uderzają w ekran, a każde uderzenie traktowane jest jako głos poparcia dla wyświetlanego obrazu. Obrazy, które zbiorą najwięcej głosów, dają początek nowej populacji. Ten pomysł nie został jednak zrealizowany w praktyce. Chcielibyśmy wiedzieć czy powstałyby obrazy prawdziwych kwiatów. Taki system wymagałby zaawansowanego sprzętu i funduszy, ale wewnętrzny system jest w zasięgu indywidualnego badacza.

Selekcja automatyczna.

W grafice ewolucyjnej selekcja automatyczna jest stosowana znacznie rzadziej niż interaktywna, ze względu na trudność w zdefiniowaniu obiektywnej funkcji sprawności do określenia tego co jest ładne. Czasami stosuje się połączenia obu metod. Na przykład Sims w jednym ze swoich programów używa selekcji automatycznej do usuwania z populacji obrazów, których tworzenie zajęłoby zbyt dużo czasu.

Przeprowadzono pewne prace, które mają stosować automatyczna ewolucje do animacji trójwymiarowych postaci. Sims stworzył program, w którym wirtualne stworzonka równocześnie rozwijają swoje kształty i zdolności ruchowe. Gritz i Hahn stworzyli system, który tworzy automatycznie animacje ręcznie zaprojektowanego trójwymiarowego aktora. W obu przypadkach niektóre pożądane zachowania są zakodowane w systemie jako kryteria sprawności. Komputer podczas fizycznej symulacji porównuje zachowanie aktora ze standardem. Różnica w porównaniu z interaktywną grafiką ewolucyjną polega nie tylko na tym, że ewolucji poddawana jest animacja, ale także w tym, że pożądany rezultat jest z góry określony, a komputer próbuje znaleźć sposób jego osiągnięcia. Natomiast większość z metod grafiki ewolucyjnej jest podróżą w nieznanym, gdzie poszukuje się obrazów, o których wcześniej by się nie pomyślało.

Koewoluujące systemy generatorów wzorów i oceniaczy.

Steven Rooke miał nadzieję rozpocząć implementację koewoluującego systemu generatora obrazu i organizmów komentatorów obrazu, ale zabrakło mu czasu.

Ewolucyjny artysta rozpoczynałby proces przez kierowanie ewolucją estetycznie przyjemnych obrazów dla jakiejś liczby początkowych pokoleń, powiedzmy 20. Wtedy uruchamia populację ewoluujących sieci neuronowych, i pozwala im pracować jakkolwiek wiele pokoleń, aż dojdzie wystarczająco blisko do estetycznej oceny artysty. Wtedy artysta przedstawia wybór estetyczny na wyewoluowaną sieć neuronową i pozwala jej pracować.

Niestety na razie, nie wiadomo jakie mogą być tego efekty.

Wizja na przyszłość.

Van Hemert: „Dzisiaj myślę, że programy evo-art. będą głównie używane jako narzędzie przy tworzeniu dużych obrazów, tak jak zaawansowany pędzel. Powoli zostaną one osadzone w większych aplikacjach takich jak oprogramowanie renderujące czy DTP w celu tworzenia fragmentów większych prac - np: szybkie wyewoluowanie tekstury do nałożenia na trójwymiarowy model powiedzmy krzesła”.

Ken Musgrave: „Programy ewolucyjnej sztuki mogą być niesamowicie ekscytujące podczas pracy z nimi, one rzeczywiście wykorzystują potencjał tego silnego asystenta idioty jakim jest komputer. Tym co ewolucyjne programy otwierają jest zdumiewająco ogromna przestrzeń różnorodnych form, którą dzisiejsza moc obliczeniowa pozwala przemierzyć poprzez zamienienie komputera w system, który pokazuje interesujące, nowo powstałe osobniki”.

„Im większa przestrzeń poszukiwań tym większa potencjalna możliwość złapania estetycznego złota. Musimy tylko stworzyć szybsze algorytmy i szybszy sprzęt, aby dać większe przestrzenie i wykonalne było ich przeszukanie”.

Wierzy on, że programy ewolucyjnej sztuki będą ostatecznie wszechobecne i wysoko wyrafinowane.

„Spoglądam w przyszłość do dnia, gdy będę miał tanią, wysokiej jakości, wielkoformatową drukarkę w domu. Wtedy mógłbym zmienić dzieła sztuki na moich ścianach w ciągu dnia. Byłoby łatwo stworzyć do 20 pięknych obrazów w ciągu dnia programem typu Dr Mutatis. Powiesiłbym je dzisiaj i zastąpił jutro: taka jednorazowa sztuka”.

Ewolucja ruchu.

Seksualni Pływacy - Jeffrey Ventrella [5].

Wirtualny ekosystem, który jest tutaj opisywany demonstruje pojawiającą się w wirtualnym stawie morfologię i lokomocję pośród populacji figur 2D. Fizyczny model umożliwia wielką różnorodność figur zdolnych napędzać siebie poprzez symulowaną wodę. Pływacy z lepszą lokomocyjnością oraz zwrotnością są zdolni jeść więcej żywności, zyskiwać energię i kojarzyć się z innymi pływakami, przez co zaopatrują przyszłe pokolenia w lepiej dostosowane bloki budujące.

Nie ma tutaj żadnej funkcji oceny: dostosowanie równa się reprodukcji. Zamodelowana jest także selekcja seksualna: genetycznie dziedziczone preferencje do kojarzenia się z osobnikami określonego koloru wpływają na dystrybucję materiału genetycznego w stawie. Pływacy o różniących się kolorach rzadko krzyżują się nawzajem, prowadzi to do podziału populacji na grupy o odmiennych kolorach.

Sytuacja w stawie może być obserwowana za pomocą interakcyjnego mikroskopu na różnych poziomach, począwszy od stylów pływackich, poprzez „wydarzenia rodzinne” i na obserwacji całej populacji kończąc. System ten demonstruje jak miejscowe zachowanie może wpływać na globalne zachowanie i jak te różne poziomy zachowań rozwijają się razem.

Zarys systemu.

Większość gatunków na ziemi rozwinęła zdolność lokomocji w wodzie, a różnorodność w morfologii pośród gatunków jest odzwierciedlona przez wielką różnorodność stylów pływania. Dla większości gatunków lokomocja jest konieczna dla znajdowania żywności, a dla wielu, do unikania stania się cudzą żywnością. Lokomocja też odgrywa rolę w reprodukcyjnym życiu większości gatunków.

Ciała naszych pływaków składają się z połączonych ze sobą kolorowych segmentów. Ruchy ciała mogą przeciwdziałać wodzie i w ten sposób uzyskiwać przyspieszenie. W tym świecie pływacy jedzą, reprodukują się i umierają. Pływacy, którzy potrafią dopłynąć do jedzenia mogą uzupełniać energię. Ci którzy nie mogą, umierają z głodu. Pływacy, którzy potrafią dopłynąć i do jedzenia i do wybranego partnera, reprodukują się. Ci którzy nie mogą się skojarzyć, nie przekazują swoich genów przyszłym pływakom.

W efekcie otrzymujemy ewolucję stylów pływania. W lokalnej skali (indywidualne style) jak i w skali globalnej (dynamika grup, populacji). Można obserwować nowo powstający fenomen pływania.

Zasymulowana jest tutaj także selekcja seksualna. Każdy pływak ma swój dziedziczony genetycznie, ulubiony kolor, który wpływa na wybór partnera spośród osobników, które on dostrzega. Preferencje te są losowane podczas startu razem z innymi genami.

Użycie koloru w modelowaniu kojarzenia się nie jest dla naszych celów estetycznych, ewentualnie pływaków, ale jako czytelna wizualizacja efektów preferencji w doborze partnera.

Autonomiczna reprodukcja.

W symulacji tej wykorzystywane są operatory genetyczne, ale nie ma tutaj dyskretnych przejść pomiędzy pokoleniami, nie występuje tutaj żadna funkcja oceny. Zamiast tego osobniki, które dopłyną do wybranego partnera automatycznie się reprodukują.

Nie ma tutaj pomocy z zewnątrz w rozwoju optymalnego pływania - poza początkowym rozmieszczeniem osobników oraz jedzenia i ustaleniu percepcji i zachowań pływaków. Niestety w wielu przypadkach cała populacja umiera zanim zostaną osiągnięte znaczące rezultaty.

To podejście nie daje też możliwości wykorzystania dobrych rozwiązań, które powstaną w stawie. Osobnik może znakomicie pływać, ale za to nie jest wybierany przez inne osobniki, albo urodził się

w mało zaludnionej lub ubogiej w żywność części stawu, wtedy dobre rozwiązanie zginie bez reprodukcji. Mamy tutaj do czynienia ze zrzęczością, ale także ze szczęściem.

Animacja w czasie rzeczywistym.

Symulacja ta posiada interaktywny element, którego budowa jest użyteczna dla tworzenia oraz analizowania.

Każdy może zobaczyć trwającą symulację używając interakcyjnego mikroskopu, którym można zbliżać i oddalać oraz przesuwać się po stawie. Przy pomocy tego mikroskopu różne części symulacji mogą być studiowane: pojedynczy pływak, grupa podobnych genetycznie pływaków w pewnym regionie stawu lub cały obszar.

Populacja 200 lub mniej osobników może być obserwowana w czasie rzeczywistym (10 lub więcej klatek na sekundę) na stacji SGI Indigo2. W eksperymentach natomiast populacja jest zwykle ustawiana na 1000 osobników, co jest już zbyt dużą liczbą. Ale populacja po pewnym czasie zmniejsza znacznie swoją liczebność, gdy ekosystem się ustabilizuje, zostawiając sprawnych pływaków. Wtedy można się przyglądać przyjemnym animacjom godzinami.

Świat.

W tym świecie występują tylko pływacy, kęsy jedzenia i granice stawu. Celem tego projektu było stworzenie jak najprostszyc i oczywistych reguł gry. Pływacy mają elementarną percepcję oraz odruchy. Zostali oni stworzeni ze zdolnością lokalizacji i wyboru jedzenia oraz partnera z ich zakresu widzenia. Spędzają oni całe swoje życie na realizowaniu tych celów.

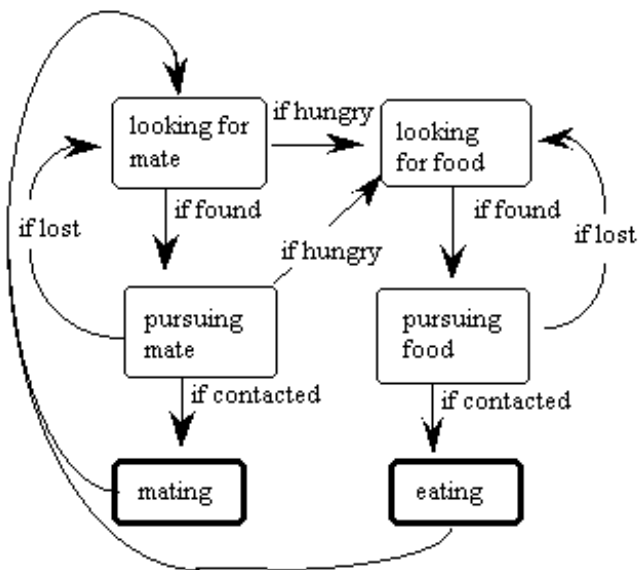
Kluczowe parametry:

- maksymalny czas życia pływaków,
- początkowy rozmiar populacji i obszaru stawu,
- jak daleko pławak może widzieć,
- lepkość wody,
- masa pływaków,
- poziom, przy którym żywność się mnoży,
- ilość żywności przy początku symulacji,
- różne poziomy przemiany żywności w energię i jej zużycia:
 - egzystowanie: minimalna ilość energii na podstawowy metabolizm,
 - poruszanie kończynami - im mocniej przeciwdziała wodzie tym więcej energii zużywa,
 - krzyżowanie się wymaga przeniesienia pewnej części energii z rodziców na potomka,
- różne ograniczenia w embriologii pływaków.

Gdy poziom energii spadnie poniżej pewnego poziomu, pławak przechodzi do stanu „głodny” przerywając wszystko co właśnie robił i zaczyna szukać jedzenia. Jeżeli znajdzie jedzenie zaczyna próbować do niego płynąć. Jeżeli nie znajdzie jedzenia albo nie może do niego dopłynąć zanim jego energia spadnie do zera, umiera z głodu.

Pływacy.

Diagram ilustruje stany jakie pływak może przyjmować oraz przejścia między nimi.



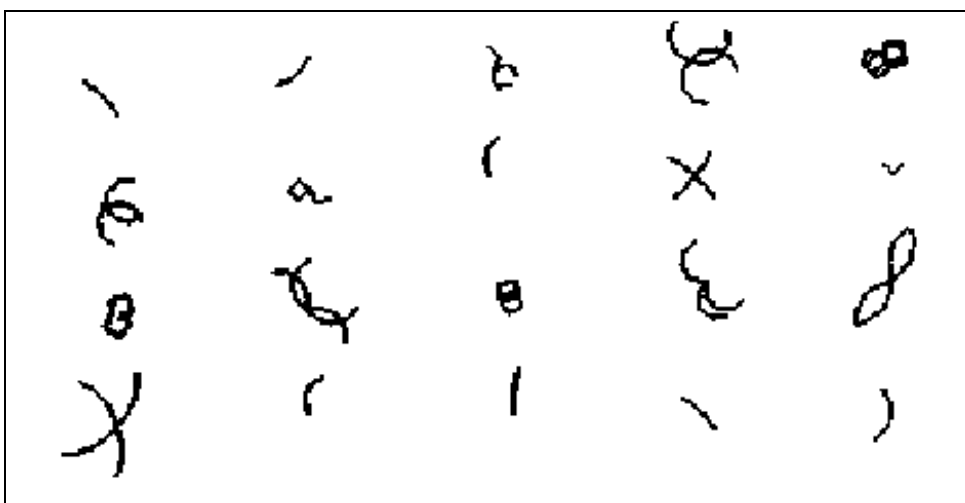
Dodatkowo z każdego stanu może być przejście do śmierci, jeżeli poziom energii spadnie poniżej zera lub zostanie przekroczony czas życia.

Pole widzenia pływaka obejmuje 360 stopni. Pływak potrafi rozpoznać:

- położenie jedzenia w jego polu widzenia,
- lokalizację potencjalnego partnera,
- proporcję kolorów ciała partnera.

Budowa.

Pływacy są figurami 2D. Mają jeden węzeł, z którego wyrastają serie kończyn (od 1 do 4). Każda kończyna jest podzielona na segmenty (od 2 do 4). Każdy segment jest tej samej długości. Przykładowe osobniki z początkowej populacji:



Każdy pływak posiada genotyp składający się z 17 genów. Każdy gen jest liczbą rzeczywistą od 0.0 do 1.0, która jest następnie przekształcana na liczbę rzeczywistą w pewnego zakresu, liczbę całkowitą lub wartość logiczną. Podczas narodzin genotypy z obu rodziców są kombinowane przy użyciu losowych

punktów przecięcia w celu stworzenia genotypu dziecka. Dodatkowo genotyp może zostać zmutowany z prawdopodobieństwem 0.01.

Geny w genotypie odpowiadają za:

- liczbę kończyn,
- liczbę segmentów w kończynie,
- rozpiętość kończyn - kąt pomiędzy kolejnymi kończynami,
- kąt połączenia stawów,
- symetryczność kończyny - gdy jest włączona to ten gen odwraca wszystkie kąty połączeń w alternatywnej kończynie.

Preferencje.

Trzy geny wpływają na wygląd pływaka, który ma wpływ na wybór partnera:

- kolor głowy,
- przesunięcie koloru dla sąsiednich segmentów ciała,
- ulubiony kolor u partnera.

Kolory obejmują trzy podstawowe i dodatkowe kolory z koła kolorów: czerwony, pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski, fioletowy (gdzie fioletowy w cyklu jest przed czerwonym).

Gdy pływak szuka partnera, wybiera tego, który posiada najwięcej segmentów w ulubionym kolorze oraz kolorach sąsiednich w kole kolorów. Przy czym ulubiony kolor ma dwa razy większą siłę.

Kojarzenie się.

W świecie pływaków nie jest modelowana płciowość. Każdy pływak może się krzyżować z dowolnym innym, z wyjątkiem bezpośrednich krewnych (rodzicie, bracia, dzieci).

Wybrany partner nie musi „odwzajemniać uczuć”, może on np. podążać za swoim wybrankiem lub szukać jedzenia. Ten fakt powoduje, że osobniki, muszą dość długo gonić swoich partnerów - co wzmacnia ewolucję umiejętności pływania.

Nie są modelowane organy płciowe. Do rozmnożenia się dochodzi, gdy pływak zbliży się do swojego partnera na odległość mniejszą niż długość jednego segmentu pływaka. Krzyżowanie obfituje co najmniej jednym potomkiem, który rodzi się dokładnie pomiędzy rodzicami, a jego kierunek jest losowany. Często pływak po rozmnożeniu się wybiera ponownie tego samego partnera do krzyżowania. W tym przypadku rodzi się następny potomek. To trwa dopóki pływak nie stanie się głodny. Zwykle powstaje w ten sposób od 1 do 4 potomków.

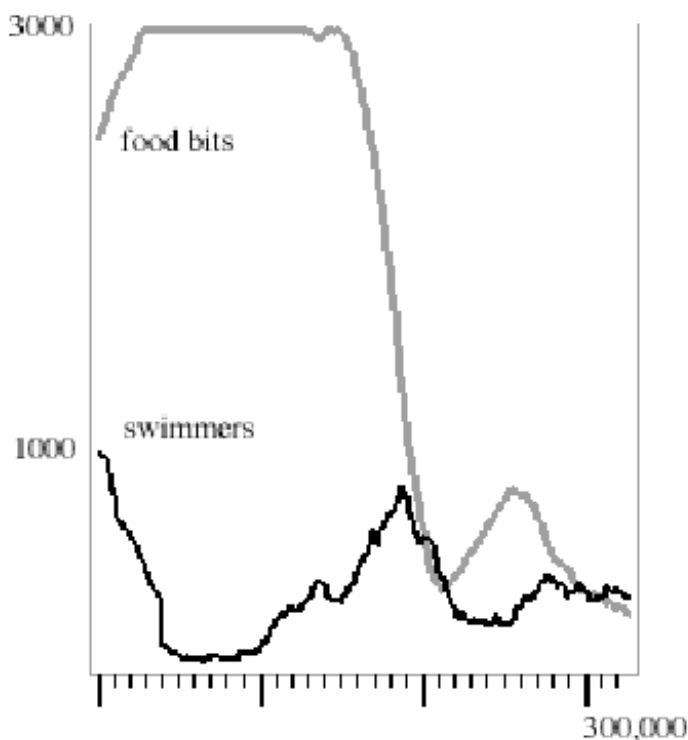
Symulacja.

Na początku typowej symulacji populacja 1000 pływaków jest inicjowana losowymi genotypami. Ich fenotypy są pozycjonowane i ukierunkowywane losowo w centrum stawu w okrągłym obszarze, nazywanym Ogrodem Edenu. Wiek każdego osobnika ustawiany jest na zero. Energia ustawiana jest na takim poziomie, jaki miałby nowo narodzony potomek z dwóch rodziców. Ogród Edenu inicjowany jest także 3000 cząstkami jedzenia.

Pływacy rodzą się głodni i natychmiast zaczynają szukać jedzenia. Podczas inicjalizacji niektórzy mają szczęście i rodzą się dość blisko pokarmu, tak że mogą go zjeść natychmiast. Wtedy zaczynają szukać partnera. Wiele pływaków z pierwszych pokoleń ginie z głodu. Natomiast z tych, którzy są w stanie coś zjeść niewiele jest w stanie się rozmnażać.

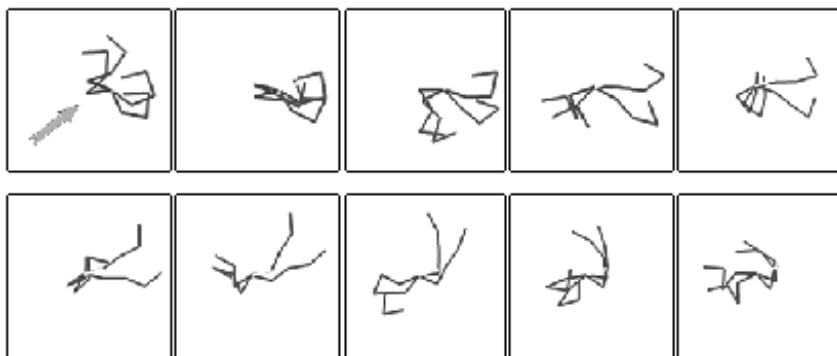
Typowe sekwencje wydarzeń podczas symulacji:

- Okres okazjonalnych urodzin i częstych śmierci,
- Wśród wysokiego poziomu zgonów zaczynają się pojawiać ogniska wysokiego poziomu narodzin, co oznacza istnienie pływających pływaków,
- Nagły spadek liczności populacji związany z wiekiem osobników z Ogrodu Edenu (w niektórych symulacjach ginie cała populacja),
- Przyrost populacji oznaczający, że pozostający przy życiu pływacy wyrobili sobie umiejętność pływania i się właśnie reprodukuja,
- Grupy powiązanych genetycznie osobników występują w izolowanych grupach,
- Wyraźne fale grup wędrujących za poszukiwaniem jedzenia z miejsc już przez nie „objedzonych”,
- Zwiększa się liczba pływaków, a zmniejsza ilość jedzenia,
- W rezultacie spadek populacji pływaków z powodu małej ilości jedzenia, zostają ci którzy dobrze rozwinęli umiejętność pływania,
- Przejęcie basenu przez jedną lub dwie grupy kolorów,
- Po paru oscylacjach ustala się poziom ilości jedzenia do liczby pływaków,
- Pojawiają się nowe grupy kolorów, a stare wymierają,
- Zwiększona prędkość, zdolność szybkiej zmiany kierunku i efektywność pod względem zużycia energii. W niektórych symulacjach populacja ewoluuje do jedno- lub dwu- kończynowych form, które poruszają się wykonując zgrabne faliste ruchy.



Wykres przedstawia zależność liczności pływaków od ilości jedzenia w czasie.

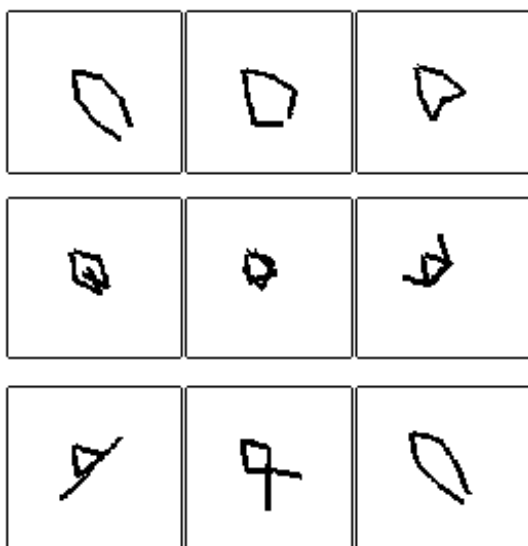
Rezultaty.



Nieefektywny styl pływania. Osobnik 4-kończynowy.



Osobnik 2-kończynowy, efektywnie pływający. Opływowe kształty, płynne ruchy.



Osobnik z zaawansowanej populacji - efektywny pod względem zużycia energii.

Symulacje ukazały „efekt ogona pawia”. Ujawniła się tendencja, że selekcja seksualna przeciwdziałała naturalnej tendencji do wyboru pływaków opływowych, wydajnych, z małą liczbą kończyn, w związku z faktem, że pływacy z większą liczbą kończyn mogą okazywać większą liczbę kolorów swoim partnerom. Potwierdziły to eksperymenty prowadzenia symulacji bez selekcji seksualnej.

Bibliografia.

- [1] Linda Moss: „Evolutionary Computer Graphics”.
<http://www.marlboro.com/~lmoss/planhome/index.html>
- [2] Steven Rooke.
<http://www.azstarnet.com/~srooke/>
- [3] Karl Sims.
<http://www.genarts.com/karl/index.html>
- [4] Jeffrey Ventrella.
<http://www.ventrella.com/Art/>
- [5] Jeffrey Ventrella: „Sexual Swimmers”.
http://www.ventrella.com/Alife/Sexual/sexual_0.html
- [6] Tomas S. Ray: „Evolution as Artist”.
<http://www.hip.atr.co.jp/~ray/pubs/art./art.html>
- [7] Vedran Vucic and Henrik Hautop Lund: „Self-Evolving Arts --- Organisms Versus Fetishes”.
<http://www.daimi.aau.dk/~hhl/art.html>
- [8] Craig Reynolds: „Evolutionary Computation”.
<http://www.red.com/cwr/evolve.html>