

Komponowanie muzyki przy pomocy algorytmów genetycznych

Autor:
Magdalena Szymska

Prowadzący:
dr Halina Kwaśnicka

SPIS TREŚCI

<i>1. Wstęp</i>	<i>3</i>
<i>2. Muzyczna terminologia</i>	<i>3</i>
<i>3. Cel algorytmu kompozycyjnego</i>	<i>4</i>
<i>4. Zastosowanie algorytmu genetycznego</i>	<i>4</i>
4.1 Przebieg algorytmu genetycznego w procesie kompozycyjnym	5
4.2 Kodowanie genomu	5
4.3 Test przystosowania	5
4.4 Rozmnażanie	6
<i>5. Przykład systemu komponującego – „Variations”</i>	<i>8</i>
<i>6. Inne algorytmy wykorzystywane w komponowaniu</i>	<i>11</i>
6.1 Algorytm iteracyjny	12
<i>7. Podsumowanie</i>	<i>14</i>
<i>8. Bibliografia</i>	<i>14</i>

1. Wstęp

Czy jest sens tworzenia dzieła muzycznego przy dominującym udziale komputera? Czy można proces twórczy przenieść na bezduszną maszynę, dla której potencjalne źródło ludzkich wzruszeń jest tylko kombinacją dźwięków? Roztrząsanie takich dylematów pozostawię innym pracom, sama zaś zajmę się techniczną stroną problemu, pokazując, że jest możliwe stworzenie utworu muzycznego „miłego dla ucha” przy śladowym udziale kompozytora- człowieka. W tym dokumencie zaprezentuję sposób tworzenia muzyki przy pomocy algorytmu genetycznego. Pokażę jaki jest podstawowy schemat wykorzystania tego algorytmu, jakie daje możliwości i jak wypada na tle innych maszynowych sposobów tworzenia muzyki. Wszystkich potencjalnych czytelników proszę o wyrozumiałość i ewentualne uwagi dotyczące treści tego dokumentu. Jestem bowiem muzycznym laikiem i wszystko, co o muzyce piszę było mi dotychczas zupełnie obce.

2. Muzyczna terminologia

Aby nieco przybliżyć tematykę dokumentu, poniżej podaję kilka definicji muzycznych terminów.

NUTY - w notacji muzycznej znaki graficzne określające wysokość dźwięków (zależnie od położenia na pięciolinii i od klucza) i ich relatywną wartość rytmiczną (np. cała nuta, półnuta itd.)

FRAZA -częstka utworu składająca się z dwóch lub więcej motywów, tworząca pewną całość wyrazową

MOTYW -najmniejsza częstka utworu, złożona z dwóch do kilkunastu dźwięków

3. Cel algorytmu kompozycyjnego

Komponowanie algorytmiczne poza czysto eksperymentalnymi zastosowaniami może służyć kompozytorowi jako źródło natchnienia, pomysł muzyczny, który może być dalej modyfikowany. Komponowanie jako proces można podzielić na trzy podstawowe części : po pierwsze pomysł, po drugie szkic muzyczny i po trzecie przełożenie tego szkicu na pewną specyficzną muzyczną formę. Krok pierwszy jako twórczy może być wspomagany przez komputer, który wygeneruje pewien surowy materiał. Szukanie „dobrej” melodii nie jest proste. Przestrzeń naszych poszukiwań nie ma wszak struktury, co szczególnie te poszukiwania utrudnia. Obok bardzo dobrej melodii może leżeć inna zupełnie nie do przyjęcia. Dla takich nieprzewidywalnych rozwiązań szczególnie dobrze nadają się algorytmy genetyczne.

Sukces kompozycji algorytmicznej zależy w głównej mierze od dwóch czynników:

- Jak najlepsze odwzorowanie procesu kompozytorskiego na implementację algorytmu
- Takie zaprogramowanie komputera, aby rzetelnie oceniał stworzone frazy

4. Zastosowanie algorytmu genetycznego

Melodia to nic innego jak sekwencja nut, z których każda ma pewne cechy jak wysokość, barwa, czas trwania, dynamika, itp. W komputerze potrzebna jest przynajmniej para liczb do opisanie nuty. Po pierwsze liczba określająca wysokość dźwięku (nuta), po drugie liczba opisująca pozycję nuty (czas jej startu). Taka para może być reprezentowana w układzie współrzędnych , gdzie wartość nuty będzie reprezentowana przez oś Y, a jej pozycja przez oś X. Przy takim podejściu wszystkie transformacje muzyczne mogą się jawić jako przekształcenia liniowe dające w wyniku nową parę liczb. Ogólne równanie dla transformacji liniowych może wyglądać następująco:

$$\text{Nowa pozycja} = a * \text{pozycja} + b$$

$$\text{Nowa nuta} = c * \text{nuta} + d$$

Można rozróżnić kilka następujących przekształceń muzycznych:

- Transpozycja

- Odwrócenie
- Zmiana rytmu
- Skalowanie (mnożenie przez ustaloną stałą; np. Melodia=„C, D, E, F, D” , stała=2.0, C=1, D=2, E=3, F=4, klucz= C major, to nowa melodia=„D, F, A, C, F”)
- Zastępowanie zbioru podzbiorem (np. C, D, E, F, D--> D,E,F)
- Powtórzenia
- Kombinacje powyższych przekształceń

4.1 Przebieg algorytmu genetycznego w procesie kompozycyjnym

W algorytmach genetycznych jednostki są muzycznymi frazami, a nuty wewnątrz fraz obrazują chromosomy. Przebieg algorytmu genetycznego można opisać w następujących punktach:

- 1) Zdefiniowanie zbioru fraz początkowych (czyli początkowej populacji). Frazy muzyczne na ogół generuje się losowo.
- 2) Wyznaczenie funkcji przystosowania dla każdej jednostki (frazy)
- 3) Wybranie zbioru najlepszych fraz (najlepiej przystosowanych)
- 4) Losowe sparowanie wybranych wcześniej fraz
- 5) Utworzenie nowego pokolenia fraz używając operacji genetycznych (reprodukcja, krzyżowanie, mutacja, permutacja)
- 6) Zastąpienie fraz rodzicielskich nowymi frazami
- 7) Powrót do kroku 2., dopóki frazy nie wypełnią określonych miar lub ilość iteracji nie osiągnie określonego limitu.

4.2 Kodowanie genomu

Najbardziej popularnym sposobem kodowania genomu jest zapisanie go w postaci łańcucha bitów. Bity pojedynczo lub grupowo reprezentują wartość nut frazy. Oczywiście do reprezentacji można użyć także liczb całkowitych lub rzeczywistych.

4.3 Test przystosowania

Pod uwagę brane mogą być bardzo różne kryteria przystosowania . W zależności od tego co w tworzonym utworze wydaje się sprawą priorytetową można mierzyć przystosowanie ze względu na rytm, ton i różnorakie kombinacje tych parametrów. Na ogół stosuje się porównywanie wygenerowanych dźwięków ze zbiorem fraz czy dopuszczalnych przekształceń bazowych zdefiniowanych w jakimś dodatkowym zbiorze.

Kryterium oceny przystosowania	Opis
Balans tonalny	Porównanie utworzonego materiału pod względem tonalnym ze zdefiniowanym materiałem bazowym. Rozważane są dopuszczalne przejścia tonalne między sąsiadującymi dźwiękami.
Balans rytmiczny	jw. z tym, że rozpatrywana jest struktura rytmiczna nowego fragmentu
Balans tonalny w stosunku do fraz wejściowych	Porównywane są nuty wejściowe i nowopowstałe . Wynik jest dobry gdy istnieje równowaga pomiędzy ilością zmienionych i niezmienionych nut
Balans skokowy	Porównaniu poddawana jest równowaga pomiędzy ruchami diatonicznymi a przeskokami interwałowymi
Spójność rytmiczna	Sprawdzany jest brak „zająknięć” w melodii. Tzn. czy krótkie nuty (np. szesnastki) nie występują między nutami długimi.

4.4 Rozmnażanie

Kiedy z grona wszystkich jednostek poddawanych ocenie przystosowania wybrani zostali najlepsi, wówczas można rozpocząć etap rozmnażania. Jak wiadomo

istnieje kilka algorytmów rozmnażania. Jeśli zastosujemy model rozmnażania oparty na dwojgu najlepiej przystosowanych rodzicach, to konsekwencją tego będzie zastosowanie algorytmu krzyżowania. Można zastosować różne metody krzyżowania. W zasadzie nie spotkałam się z zaleceniem, co do używania jakiejś konkretnej operacji krzyżowania w procesie komponowania.

Jeśli natomiast z jakichś przyczyn niemożliwe jest używanie dwojga rodziców do reprodukcji wówczas proces rozmnażania polega tylko na zastosowaniu mutacji do materiału rodzicielskiego. Oczywiście dla potomków par dwujednostkowych również używa się operacji mutacji. Mutacją jak wiadomo rządzi prawdopodobieństwo. Prawdopodobieństwo, czy jakiś bit w genomie zmieni się na przeciwny. Jeśli prawdopodobieństwo mutacji jest zbyt duże wówczas istnieje niebezpieczeństwo że ewolucja będzie losowa. Jeśli natomiast prawdopodobieństwo będzie zbyt małe, proces nie będzie odzwierciedlał reguł ewolucji naturalnej. Należy więc tak dobrać parametr prawdopodobieństwa zaistnienia mutacji, aby zrównoważyć możliwość zaistnienia tych dwóch sytuacji.

Pomimo iż algorytmy genetyczne wydają się być dobrymi metodami automatycznego komponowania, to jednak istnieje kilka problemów, które skutecznie to komponowanie utrudniają. Największym problemem jest ogromna przestrzeń możliwych rozwiązań. Duża wielkość dziedziny zadania prowadzi do tego, że szukanie optymalnego rozwiązania może trwać bardzo długo. Kolejny problem stanowi brak struktury przestrzeni poszukiwań. To czyni poszukiwanie nieprzewidywalnym a o za tym idzie, również trudnym. Aby nieco ułatwić sobie to zadanie możliwe są dwa podejścia:

- Zredukowanie dziedziny problemu i praca nad prostą muzyką
- Praca z większymi blokami. Zamiast operować na poziomie nut należy zajmować się frazami i motywami

Trzeci problem tkwi w ustalaniu kryteriów przystosowania. Bardzo ważne jest aby kryteria te nie były zbyt słabe, w takim wypadku rozwiązanie może bowiem okazać się mało satysfakcjonujące od strony muzycznej.

Komponowanie algorytmiczne doczekało się wielu prób i eksperymentów. Na ogół stosowano pierwsze rozwiązanie ułatwiające znalezienie optymalnego

rozwiązania, czyli ograniczenie dziedziny problemu. W 1991 niejaki A.Horner zajmował się przekształcaniem pewnej melodii w inną, J.Biles generował proste melodie z zadany z góry postępem akordu, natomiast D.Horowitz zajmował się rytmami w obrębie jednego taktu. Teraz zaprezentuję zarys systemu wykorzystującego drugie podejście do problemu czyli budowanie większych bloków.

5. Przykład systemu komponującego – „Variations”

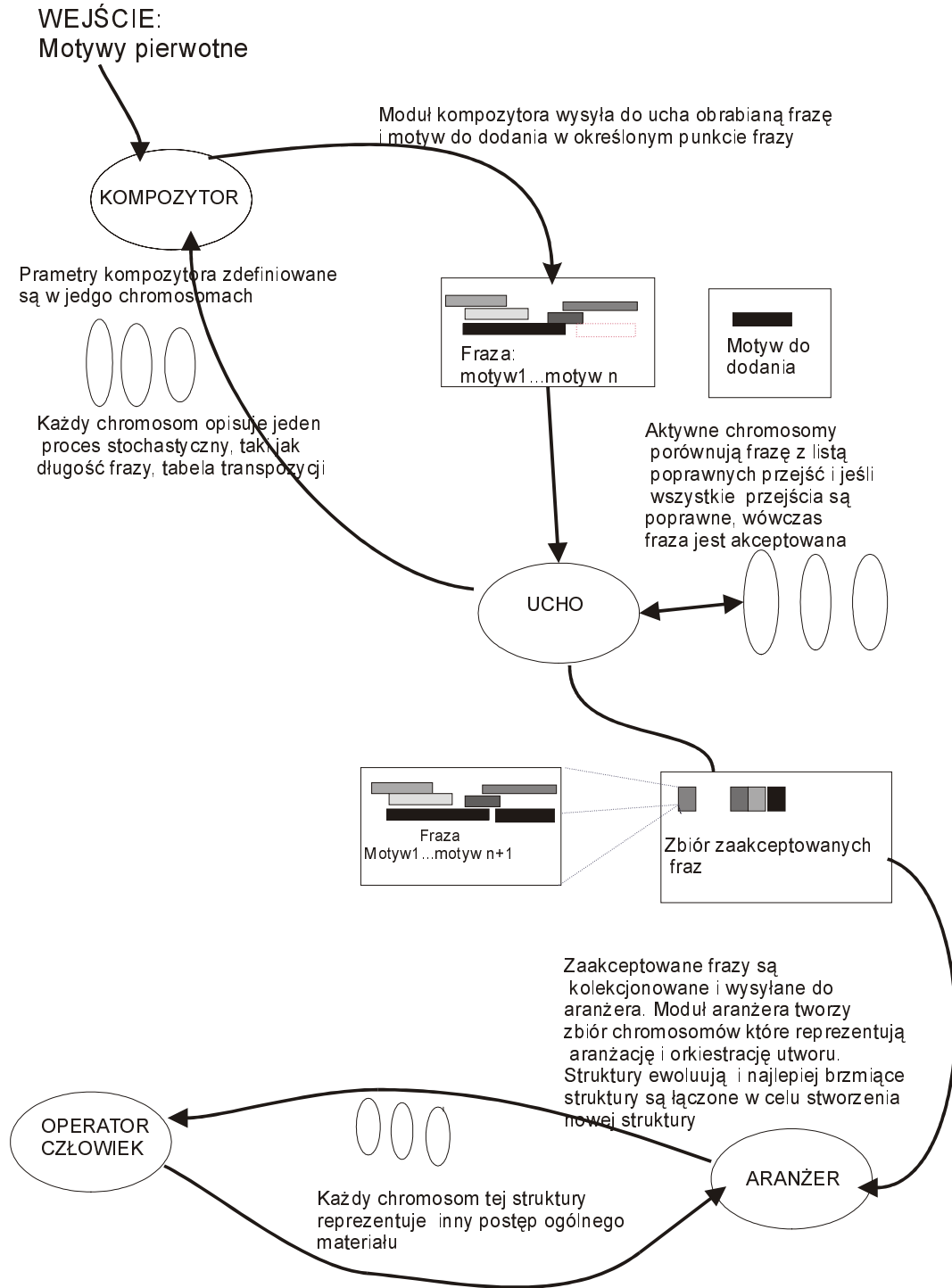
Projekt zaczyna się od zredukowania procesu kompozycyjnego do kilku prostych reguł, które można prosto przekształcić w program komputerowy:

1. Zdefiniowanie zbioru motywów pierwotnych , używanych później do kompozycji
2. Kompozycja fraz przez nawarstwianie i łączenie motywów
3. Tworzenie nowych motywów przez selekcję z motywów pierwotnych i tych będących już we frazie , później tworzenie wariacji bazującej na tej selekcji
4. Łączenie fraz w większe jednostki

Powyższe reguły tworzą podstawę systemu „Variations”. Kompozycja motywów, ocena powstałej muzyki i aranżowanie całych utworów wykonywane jest w nim przez agentów genetycznych-moduły kompozytora, ucha i aranżera. Moduł kompozytora tworzy muzykę, moduł ucha odfiltrowuje zły materiał a moduł aranżera nakłada porządek na powstałe frazy. Operator-człowiek ocenia agentów wg ich umiejętności tworzenia przyjemnej muzyki i dzięki zastosowaniu algorytmu genetycznego tworzy jeszcze lepszych.

Jak już wcześniej pisałam system nie pracuje na poziomie nut lecz zajmuje się poziomem fraz i motywów. System komponuje i ocenia małe frazy , później są one aranżowane w większe kawałki. Na powstający utwór nakładany jest porządek, który bazuję na tym, że poszczególne motywy utworu muszą odnosić się do siebie przez rozpoznawalną transformację jak transpozycja czy inwersja. Takie ograniczenie gwarantuje, że końcowy utwór będzie w jakiś sposób spójny.

SCHEMAT ALGORYTMU KOMPOZYCYJNEGO W SYSTEMIE „Variations”



Agenci kompozytor i ucho startują z losowo wygenerowaną charakterystyką dopasowaną następnie do gustu operatora- człowieka. Operator ludzki definiuje zbiór pierwotnych motywów, które zostaną użyte do kompozycji. Moduł kompozytora tworzy wariacje każdego motywu przez nawarstwianie dołączając go do frazy. Ilekroć motyw dodawany jest do frazy, jest to konsultowane z modułem ucha. Jeśli ucho nie zaakceptuje danego motywu, wówczas jest on odrzucany. W ten sposób muzyka wyjściowa dostosowywana jest do systemu brzmieniowego zdefiniowanego w chromosomach ucha . jeśli stworzonych zostanie wystarczająco dużo dobrych fraz wówczas moduł aranżera tworzy kilka możliwych układów tychże fraz, które są oceniane i zmieniane w celu uzyskania jak najlepszego porządku.

Algorytmy genetyczne używane są w każdym z ww. komponentów, jednak na różne sposoby. Moduł kompozytora opiera się na procesie stochastycznym tworząc wariacje materiału wejściowego. Jego parametry ustalane są przez zbiór chromosomów. Moduł aranżera jako wartości wejściowe pobiera listę fraz uznanych za dobre i generuje z nich wiele różnych układów. Nie wszystkie frazy używane są w każdym z układów. Najlepsze układy używane są do tworzenia nowych układów, stąd ich użycie podobne jest do rozwiązywania problemu komiwojażera. Moduł ucha jest kolekcją chromosomów, z których każdy reprezentuje inny system brzmieniowy. Ucho jest najważniejszą częścią całego systemu. Każdy chromosom ucha pełni rolę filtra danych, identyfikując poszczególne kombinacje jako dobre lub złe.

Początkowe chromosomy tworzone są losowo. Następnie są one oceniane i ewoluują zgodnie z zasadami algorytmu genetycznego, by uzyskać jak najlepszy wynik, tj. moduł, który będzie produkował materiał o spójnym systemie dźwiękowym. Przystosowanie materiału genetycznego w tym wypadku zależy od gustu operatora- człowieka, który ocenia poszczególne brzmienia. Generowany jest muzyczny przykład, który przepuszczany jest przez chromosomy ucha. Operator ludzki przydziela wagi chromosomom w zależności od tego, jak harmonizują z jego upodobaniami. Chromosomy z wysokimi ocenami mają większe prawdopodobieństwo bycia reprodukowanymi, a ich allele są obecne w następnej generacji. Nowe pokolenie w ten sposób wykazuje najlepsze cechy wcześniejszej generacji. Jeśli istnieje już satysfakcjonujący zbiór filtrów wówczas rozpoczyna się proces przedstawiony na rysunku 1.

Alele chromosomów ucha reprezentują poprawne (dopuszczalne) kombinacje wysokości tonów. Każda alela ma długość 12 bitów. Sąsiednie alele wskazują jednokierunkowe poprawne przejścia między nutami. Co więcej przestawienie poprawnych kombinacji wysokości tonów, jak również przejścia pomiędzy dwoma kombinacjami są również poprawne.

Jeśli na przykład dwie sąsiednie allele wskazują, że poprawne jest przejście:

Wówczas poprawne będzie również przejście :

Natomiast następująca transpozycja jest już błędna

Utwór jest akceptowany przez chromosomy ucha jeśli po sprawdzeniu okaże się, że wszystkie przejścia pomiędzy tonami są prawidłowe. Muzyka jest najpierw sprowadzana do jednej oktawy. Ucho sprawdza pionowe kombinacje pomiędzy wysokościami nut stosując ośmionutowy rozkład.

Poniżej pokazane są cztery fragmenty kompozycji stworzonej przez ten system (rys2a). Na rysunku 2b pokazane zostały chromosomy ucha. Rysunek 2c pokazuje motywy pierwotne użyte do komponowania.

6. Inne algorytmy wykorzystywane w komponowaniu

Do generowania muzyki można również wykorzystywać inne rodzaje algorytmów, które da się zaadaptować do komputerowego komponowania. Do tego celu w mniejszym lub większym stopniu nadają się:

- Algorytm stochastyczny

- Algorytm iteracyjny
- Algorytm seryjny
- Algorytm oparty na fraktalach

W algorytmie stochastycznym nuty generowane są losowo. Kompozytor określa ilość losowanych nut oraz ilość kroków algorytmu. Choć z pewnością zaletą tego typu algorytmu jest jego prostota to jakość tworzonych muzyki jest jednak niska. Natomiast algorytm iteracyjny generuje dobry materiał muzyczny i jest łatwy do zaimplementowania. Czasem może jednak produkować muzykę mało odkrywczą i po prostu nudną. Algorytm seryjny przeciwnie, jest skomplikowany i w dodatku generuje muzykę o niskiej jakości artystycznej. Natomiast algorytm oparty na fraktalach generuje muzykę umiarkowanej jakości i takich też trudności (umiarkowanych) nastrocza programiście.

Dalej zaprezentuję algorytm iteracyjny, aby pokazać jak w inny od ewolucyjnego sposób, można stworzyć interesującą brzmieniowo muzykę.

6.1 Algorytm iteracyjny

W tym rozwiązaniu w celu stworzenia danych, które mogą być przydatne muzycznie wykorzystywany jest system równań matematycznych. Równania są wykorzystywane w procesie przekształcania wejściowych danych wg określonych matematycznych reguł.

Rozwiązanie jest reprezentowane przez punkt w n -wymiarowej przestrzeni. (n jest określone przez ilość parametrów). Przestrzeń rozwiązań jest określana jako orbita systemu (*orbit of the system*).

Można wyróżnić trzy typy zachowań systemu:

- Stałe, gdy wszystkie punkty na orbicie są takie same
- Oscylujące, gdzie wszystkie punkty należą do powtarzającego się zbioru punktów
- Chaotyczne, w którym orbita zachowuje się nieprzewidywalnie i losowo, nigdy nie wykorzystując dwa razy tego samego punktu

W zasadzie jedynymi zachowaniami systemu, które dają ciekawe rozwiązania są zachowania chaotyczne. W takim rozwiązaniu w poszczególnych iteracjach generowane są podobne lecz nie takie same zestawy punktów. W muzycznej nomenklaturze można by mówić o wariacji. Wyprodukowany materiał jest zawsze podobny do wyjściowego, ale wnosi również pewne nowe elementy. Istnieją rozwiązania które nadają się do stworzenia takich orbit. Są to: „Mapa Henona” i „Mapa Logistyczna”.

Mapa Henona to prosty dwuwymiarowy system, uproszczony model orbity skoncentrowanej wokół ośrodka grawitacyjnego gwiazdy, odkryty przez astronoma Henona.

Ogólne równanie dla mapy Henona wygląda następująco:

$$\begin{aligned}x(n+1) &= y(n+1) - A * x(n) * x(n) \\ y(n+1) &= B * x(n)\end{aligned}$$

gdzie A i B to stałe.

Ten układ równań może być prosto zaimplementowany jako algorytm iteracyjny. Jeśli przyjmujemy wartości stałych $A=1,4$ i $B=0,3$ wówczas implementacja tego algorytmu może wyglądać następująco:

```
void henon ( float x, float y, int num ){
    float A = 1.4;
    float B = 0.3;
    float newX = 0;
    float newY = 0;
    for ( i = 0; i < num; i++){
        play-note ( x, y );
        newX = y + 1.0 - ( A * ( x * x ) );
        newY = B * x;
        x = newX;
        y = newY;
    }
}
```

Mapa logistyczna jest natomiast jednowymiarowym równaniem używanym do modelowania wzrostu populacji w czasie. Równanie jest bardzo proste ale dostarcza bardzo bogatego zbioru zachowań parametru A, kiedy poddane jest iteracji.

Ogólne równanie wygląda następująco:

$$x(n+1) = A * x(n) * (1 - x(n)) \quad \text{gdzie } 0 < A \leq 4$$

O wartości A decyduje kompozytor, ale musi wziąć pod uwagę ogromny wpływ jego doboru na strumień wyjściowy. Mianowicie:

- Dla wartości A pomiędzy 1 i 0 równanie zbiegnie do punktu $x=0$
- Dla wartości A pomiędzy 1 a 3 zmienna x zbiegnie do punktu $1-A$
- Dla wartości powyżej 3 mogą zaistnieć cykle w których wszystkie wartości x będą krążyć pomiędzy 2,4,8 itd. Nazywane jest to kaskadą harmoniczną i prowadzi do punktu, w którym dla określonego A, zachowanie systemu jest chaotyczne. Takie rozwiązanie, które powoduje zachowanie chaotyczne, jest najlepszym rozwiązaniem.

7. Podsumowanie

Mam nadzieję że udało mi się przynajmniej w minimalnym stopniu pokazać jak różnorodne są możliwości tworzenia muzyki, za pomocą komputera. Samo wykorzystanie algorytmów genetycznych może przebiegać na kilka sposobów. A przecież sposobów algorytmicznego komponowania jest kilka.

A jednak mimo pomyślnych rezultatów w wykorzystaniu tychże algorytmów, wygenerowana przy ich pomocy muzyka jest zaledwie „przyjemna”. Warto zastanowić się nad wciąż ogromną przewagą geniuszu człowieka nad bardzo skomplikowaną maszyną. Pomyślmy o tym słuchając „ludzkiej” muzyki, która powala na kolana.

8. Bibliografia

- David Goldberg „Algorytmy genetyczne i ich zastosowania”
- www.algoart.com
- www.ee.umd.edu/~blj/papers/icmc95
- Bruce L.Jacob „Composing with genetic algorithms”