

UNIwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Wydział Matematyki i Informatyki

Cezary Adam Pukownik

Kierunek: Analiza i przetwarzanie danych
Numer albumu: 444337

Generowanie muzyki przy pomocy głębokiego uczenia

Music generation with deep learning

Praca magisterska
napisana pod kierunkiem
prof. UAM dra hab. Tomasza Góreckiego

POZNAŃ 2020

Poznań, dnia 30 czerwca 2020

OŚWIADCZENIE

Ja, niżej podpisany student Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oświadczam, że przedkładaną pracę dyplomową napisałem samodzielnie. Oznacza to, że przy pisaniu pracy, poza niezbędnymi konsultacjami, nie korzystałem z pomocy innych osób, a w szczególności nie zlecałem opracowania rozprawy lub jej części innym osobom ani nie odpisywałem tej rozprawy lub jej części od innych osób.

Jednocześnie przyjmuję do wiadomości, że przypisanie sobie w pracy dyplomowej autorstwa istotnego fragmentu lub innych elementów cudzego utworu lub ustalenia naukowego stanowi podstawę stwierdzenia nieważności postępowania administracyjnego w sprawie nadania tytułu zawodowego.

Ja, niżej podpisany student Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oświadczam, że egzemplarz pracy dyplomowej w wersji drukowanej jest całkowicie zgodny z egzemplarzem pracy dyplomowej w wersji elektronicznej.

[TAK]* - wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w czytelni Archiwum UAM

[TAK]* - wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w zakresie koniecznym do ochrony mojego prawa do autorstwa lub praw osób trzecich

*Należy wpisać TAK w przypadku wyrażenia zgody na udostępnianie pracy w czytelni Archiwum UAM, NIE w przypadku braku zgody. Niewypełnienie pola oznacza brak zgody na udostępnianie pracy.

.....

Spis treści

Streszczenie	7
Abstract	9
Wstęp	11
Rozdział 1. Wprowadzenie do sieci neuronowych	13
1.1. Regresja liniowa	13
1.2. Uczenie modelu	14
1.2.1. Funkcja kosztu	15
1.2.2. Znajdowanie minimum funkcji	15
1.2.3. Metody gradientowe	15
1.3. Regresja liniowa jako model sieci neuronowej	17
1.4. Funkcje aktywacji	19
1.5. Wielowarstwowe sieci neuronowe	20
1.5.1. Jednokierunkowe sieci neuronowe	21
1.5.2. Autoenkoder	21
1.5.3. Rekurencyjne sieci neuronowe	22
1.5.4. LSTM	23
1.5.5. Sequence-to-sequence	25
Rozdział 2. Wprowadzenie do teorii muzyki	27
2.1. Podstawowe koncepcje muzyczne	27
2.1.1. Dźwięk muzyczny	27
2.1.2. Sygnał dźwiękowy	27
2.1.3. Zapis nutowy	27
2.2. Cyfrowa reprezentacja muzyki symbolicznej	31
2.2.1. Standard MIDI	31
Rozdział 3. Projekt	35
3.1. Koncepcja	35
3.2. Wstępne przygotowanie danych do treningu	36
3.2.1. Muzyczne słowo	36
3.2.2. Konwersja MIDI na sekwencje słów muzycznych	36
3.2.3. Inne aspekty przygotowania danych	39
3.2.4. Podział danych na dane wejściowe i wyjściowe	40
3.2.5. Inne aspekty przygotowania zbioru uczącego	42

3.3.	Definicja modelu	44
3.3.1.	Model w trybie uczenia	44
3.3.2.	Model w trybie wnioskowania	46
3.4.	Transformacja danych dla modelu	48
3.4.1.	Enkodowanie one-hot	49
3.4.2.	Słownik	49
3.4.3.	Elementy specjalne	50
3.4.4.	Kodowanie sekwencji	50
3.5.	Ekperyment	51
3.5.1.	Oprogramowanie	51
3.5.2.	Zbiór danych	52
3.5.3.	Wydobycie danych	52
3.5.4.	Trenowanie modelu	53
3.5.5.	Generowanie muzyki przy pomocy wytrenowanych modeli . .	54
3.5.6.	Wyniki	56
	Podsumowanie	61
	Bibliografia	63

Streszczenie

W pracy magisterskiej pod tytułem „Generowanie muzyki przy pomocy głębokiego uczenia” został zaproponowany przykład sieci neuronowej, którego celem jest generowanie krótkich multiinstrumentalnych klipów muzycznych.

Główna część pracy została poprzedzona wprowadzeniem do tematu sieci neuronowych oraz teorii muzyki, w celu lepszego zrozumienia omawianego tematu. W rozdziale 1 przeznaczonym teorii sieci neuronowych autor przedstawia w jaki sposób rozbudować regresję liniową, aby otrzymać model sieci neuronowej. Omawia rekurencyjne sieci neuronowe, komórki LSTM oraz model sequence-to-sequence. W rozdziale 2 poświęconym teorii muzyki autor odróżnia dwa pojęcia: muzykę w rozumieniu fizycznego zjawiska oraz muzykę symboliczną jaką obiekt abstrakcyjny. Następnie zostały opisane podstawowe obiekty muzyczne oraz przedstawiony protokół MIDI. Protokół MIDI jest międzynarodowym standardem komunikacji instrumentów muzycznych, a w formie plików przechowuje informacje o muzyce w formie podobnej do zapisu nutowego. Pliki MIDI zostały wykorzystane jako źródło informacji dla sieci neuronowej.

Rozdział 3 zawiera główną część pracy. Autor przyrównuje partie muzyczne do języka mówionego, a różne instrumenty do różnych języków świata. Dlatego do generowania muzyki została wykorzystana architektura służąca do tłumaczenia maszynowego języków sequence-to-sequence. W pracy zostanie zaproponowane kodowanie muzyki jako sekwencje zdarzeń, nazywanych w pracy „muzycznymi słowami”, gdzie każde słowo posiada informacje o wysokości i długości trwania dźwięku, czy akordu albo pauzy. Następnie zostanie zdemostrowana architektura modelu wraz z jej implementacją w języku Python z wykorzystaniem biblioteki Keras oraz szczegółowy opis procesu przygotowania danych dla modelu.

W dalszej części tego samego rozdziału zostaje omówiony przykład wykorzystania zaproponowanego modelu do generowania muzyki. Jako dane źródłowe dla modelu zostało użytych siedem utworów zespołu The Offspring. Autor przeprowadza przez cały proces od wydobycia danych z plików MIDI przez uczenie do generowania utworów muzycznych. Na zakończenie pracy zostały pokazane przykłady wygenerowanych utworów.

Abstract

In the master's thesis titled "Music generation with deep learning", an example of a neural network was proposed whose purpose is to generate short multi-instrumental music clips.

The main part of the work was preceded by an introduction to the topic of neural networks and music theory in order to better understand the subject. In the 1 chapter dedicated to the theory of neural networks, the author presents how to expand linear regression to obtain a neural network model, and presents recursive neural networks, LSTM cells and the sequence-to-sequence model. In the chapter 2 devoted to the theory of music, the author distinguishes two concepts, music in the understanding of a physical phenomenon, and symbolic music as an abstract object. Then the main music concepts were described and the MIDI protocol was presented. The MIDI protocol is an international standard for communication of musical instruments and in the form of files stores information about music in a form similar to sheet music. MIDI files have been used as a source of information for the neural network.

The main part of the work is presented in chapter 3. The author compares music to the spoken language and various instruments to different languages of the world. Therefore, the architecture used for machine translation of languages was used to generate music. The work proposes encoding music as a sequence of events, called in the work "musical words", where each word has information about the pitch and length of the sound, chord or pause. Then the model architecture is demonstrated with its implementation in Python using the Keras library and a detailed description of the data preparation process for the model.

The rest of this chapter discusses an example of using the proposed model to generate music. As the source data for the model, seven songs from The Offspring were used. The author guides through the process of extracting data from MIDI files, training model and generating music pieces. At the end of the work, examples of generated songs were shown.

Wstęp

Uczenie maszynowe w ostatnich latach mocno zyskało na popularności. Zastosowania i możliwości różnych algorytmów uczenia maszynowego czasami przekraczają nasze wyobrażenie, o tym co komputer może zrobić. Wśród aplikacji opartych na sztucznej inteligencji znajdują się takie, które potrafią przewidywać następne wartości akcji giełdowych, rozpoznawać na filmie obiekty w czasie rzeczywistym, czy nawet prowadzić samochód. Algorytmy prezentują nam spersonalizowane reklamy produktów na podstawie naszych upodobań. Najczęstsze zastosowania dotyczą przetwarzania obrazów lub tekstu, natomiast zastosowania w przetwarzaniu muzyki są rzadziej spotykane.

Celem tej pracy jest stworzenie modelu sieci neuronowej, którego zadaniem będzie generowanie krótkich multi instrumentalnych klipów muzycznych.

W pierwszej części pracy opiszę w jaki sposób działają sieci neuronowe, jak się uczą oraz podstawowe architektury sieci, które pomogą zrozumieć model, który wykorzystałem. Następnie krótko przedstawię podstawowe koncepcje związane z muzyką oraz sposobami jej reprezentacji.

W następnym kroku przedstawię swój projekt modelu. Omówię jakie idee stały za wyborami, które podjąłem w projektowaniu sieci. Szczegółowo opiszę sposób ekstrakcji danych tak, aby mogły być one wykorzystane przez model. Opiszę architekturę, którą wybrałem oraz przedstawię i opiszę fragmenty kodu w języku Python. W tym samym rozdziale zademonstruję na przykładowym zbiorze danych proces ich przetworzenia, uczenia modelu oraz generowania muzyki. Na końcu pokażę i omówię wyniki.

Wprowadzenie do sieci neuronowych

Aby lepiej zrozumieć w jaki sposób odpowiednio skonstruowane sieci neuronowe potrafią sprostać takiemu zadaniu jak generowanie muzyki, w tym rozdziale przedstawię od podstaw zasady działania sieci neuronowych. Opiszę w jaki sposób można od regresji liniowej przejść do prostych sieci oraz w jaki sposób uczy się sieci neuronowe. Ostatecznie przedstawię architektury, które wykorzystałem w projekcie.

1.1. Regresja liniowa

Podstawą wszystkich sieci neuronowych jest regresja liniowa. W statystyce wykorzystywana, aby wyjaśnić liniowe zależności między zmiennymi.

Prosty model regresji liniowej dla jednej zmiennej można opisać wzorem

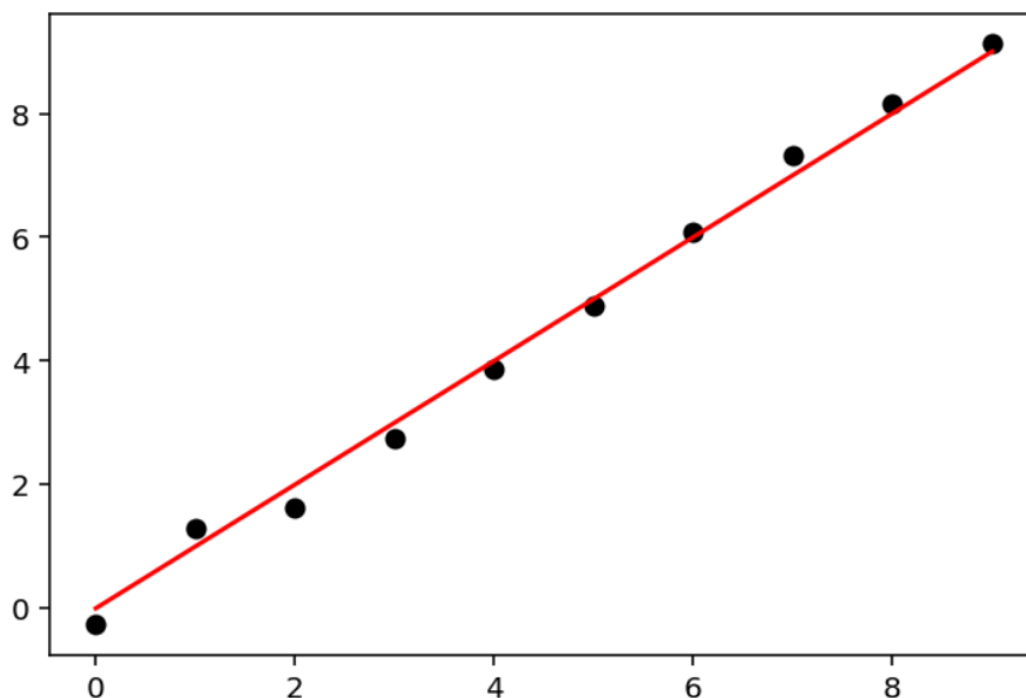
$$y = ax + b + \epsilon,$$

gdzie

- y jest zmienną objaśnianą,
- x jest to zmienna objaśniająca,
- a jest parametrem modelu,
- b jest wyrazem wolnym modelu,
- ϵ jest składnikiem losowym [10].

Zadaniem jest znalezienie takiego parametru $a \in \mathbb{R}$ oraz wyrazu wolnego $b \in \mathbb{R}$, aby dla znanych wartości $x \in \mathbb{R}$ oszacowanie zmiennej objaśnianej $\hat{y} \in \mathbb{R}$ najlepiej opisywała zmienną objaśnianą $y \in \mathbb{R}$. Tak zdefiniowany model opisuje zmienną y z dokładnością do składnika losowego. W praktyce oznacza to, że szacowane modele będą przybliżeniem opisywanych zależności.

Wartość zmiennej objaśnianej y można również opisać za pomocą wielu zmiennych objaśniających. Wtedy dla zmiennych objaśniających $x_1, x_2, \dots, x_p \in \mathbb{R}$ szukamy parametrów $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p \in \mathbb{R}$, gdzie $p \in \mathbb{N}$ jest liczbą cech. Otrzymany w ten sposób model nazywany jest również hipotezą i oznaczamy go $h(x)$.



Rysunek 1.1. Regresja liniowa jednej zmiennej

$$h(x) = b + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \dots + \theta_p x_p + \epsilon = b + \sum_{i=1}^p \theta_i x_i + \epsilon.$$

Rysunek 1.1 przedstawia przykładowy dopasowany model regresji liniowej jednej zmiennej.

1.2. Uczenie modelu

Celem uczenia modelu jest znalezienie ogólnych parametrów, aby model dla wartości wejściowych x zwracał wartości predykcji \hat{y} najlepiej opisującej całe zjawisko według pewnego kryterium. Formalnie, aby suma wszystkich różnic między predykcją, a rzeczywistością była najmniejsza.

$$\text{błąd} = \sum_{i=1}^n |\text{predykcja} - \text{rzeczywistość}|,$$

gdzie $n \in \mathbb{N}$ jest wielkością zbioru danych jakim dysponujemy. Minimalizując błąd dla modelu jesteśmy w stanie znaleźć przybliżenie funkcji $h(x)$.

1.2.1. Funkcja kosztu

W tym celu używa się funkcji $J_\theta(h)$, która zwraca wartość błędu między wartościami $h(x)$ oraz y dla wszystkich obserwacji. Taka funkcja nazywana jest funkcją kosztu (*ang. cost function*).

Dla przykładu regresji liniowej funkcją kosztu może być błąd średniokwadratowy (*ang. mean squared error*). Wtedy funkcja kosztu przyjmuje postać

$$J_\theta(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - h(x_i))^2.$$

Przy zdefiniowanej funkcji kosztu proces uczenia sprowadza się do znalezienia takich parametrów funkcji $h(x)$, aby funkcja kosztu była najmniejsza. Jest to problem optymalizacyjny sprowadzający się do znalezienia globalnego minimum funkcji.

1.2.2. Znajdowanie minimum funkcji

Aby znaleźć minimum funkcji f możemy skorzystać z analizy matematycznej. Wiemy, że jeśli funkcja f jest różniczkowalna to funkcja może przyjmować minimum lokalne, gdy $f'(x_0) = 0$ dla pewnego x_0 z dziedziny funkcji f . Dodatkowo jeśli istnieje otoczenie punktu x_0 , że dla wszystkich punktów z tego otoczenia spełniona jest nierówność:

$$f(x) > f(x_0),$$

to znaleziony punkt x_0 jest minimum lokalnym. W teorii należałoby zatem wybrać taką funkcję kosztu, aby była różniczkowalna. Rozwiązać równanie $J'_\theta(h) = 0$, następnie dla otrzymanych wyników sprawdzić powyższą nierówność oraz wybrać najmniejszy wynik ze wszystkich [8]. W praktyce rozwiązanie takiego równania ze względu na jego złożoność może się okazać niewykonalne. Aby rozwiązać ten problem powstały inne metody, które pozwalają szukać ekstremów funkcji, jednak nigdy nie będziemy mieli pewności, że otrzymany wynik jest minimum globalnym funkcji kosztu.

1.2.3. Metody gradientowe

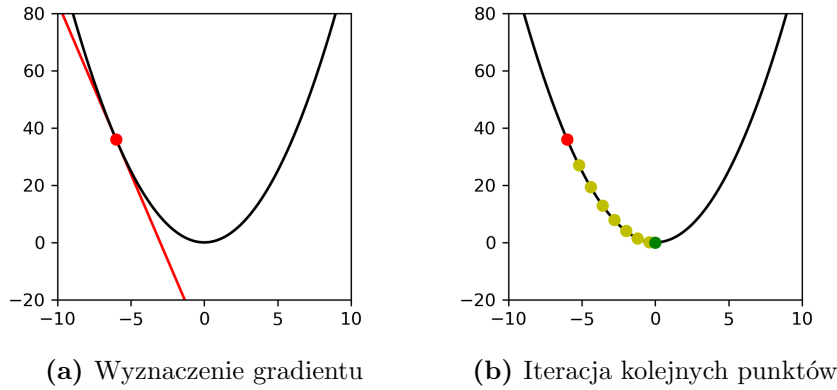
Metody gradientowe (*ang. gradient descent*) są to iteracyjne algorytmy służące do znajdowania minimum funkcji. Aby móc skorzystać z metod gradientowych analizowana funkcja musi być ciągła i różniczkowalna. Sposób ich działania można intuicyjnie opisać w następujących krokach.

1. Wybierz punkt początkowy.
2. Oblicz kierunek, w którym funkcja maleje.

3. Przejdź do kolejnego punktu zgodnie obliczonym kierunkiem o pewną małą wartość.

4. Powtarzaj, aż osiągniesz minimum funkcji.

Wizualizacja algorytmu została przedstawiona na rysunku 1.2.



Rysunek 1.2. Wizualizacja algorytmu gradientu prostego

Dla funkcji $h(x)$ należy ustalić wartość początkową Θ_0 dla wszystkich parametrów $\theta_1 \dots \theta_p$.

$$\Theta_0 = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n].$$

Następnie policzyć wszystkie pochodne częściowe $\frac{\partial J_\theta(h)}{\partial \theta_i}$. Otrzymamy w ten sposób gradient $\nabla J_\theta(h)$, gdzie

$$\nabla J_\theta(h) = \left[\frac{\partial J_\theta(h)}{\partial \theta_1}, \frac{\partial J_\theta(h)}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial J_\theta(h)}{\partial \theta_p} \right],$$

wtedy można obliczyć element Θ_{k+1} ze wzoru

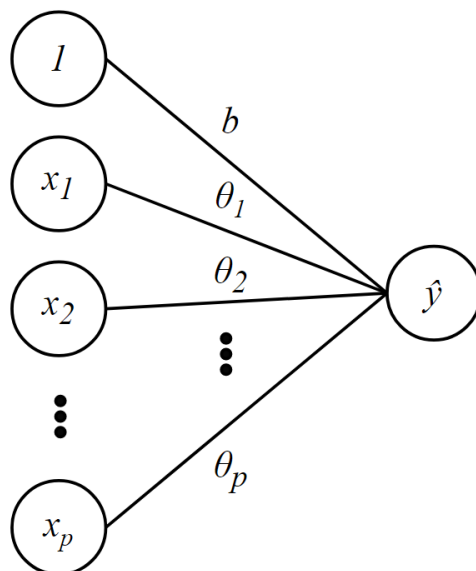
$$\Theta_{k+1} = \Theta_k - \alpha \nabla J_\theta(h),$$

gdzie $\alpha \in \mathbb{R}$ jest współczynnikiem uczenia (*ang. learning rate*), a $k \in \mathbb{N}$ jest kolejną iteracją algorytmu. Proces ten należy powtarzać do pewnego momentu. Najczęściej z góry określoną liczbę razy lub do momentu, gdy uzysk funkcji kosztu spowodowany następną iteracją jest mniejszy niż ustalona wartość. Otrzymany w ten sposób wektor parametrów Θ_k jest wynikiem algorytmu [1].

Wykorzystując metody gradientowe otrzymujemy wyuczony model. Parametry θ_i modelu $h(x)$ zostały ustalone w taki sposób, aby błąd między predykcją, a rzeczywistością był najmniejszy.

1.3. Regresja liniowa jako model sieci neuronowej

Omawiany model regresji możemy zapisać w sposób graficzny tak jak przedstawiono na rysunku 1.3.



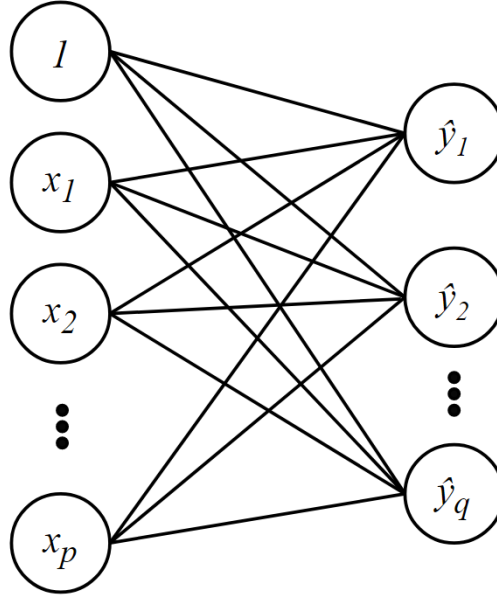
Rysunek 1.3. Regresja liniowa jako model sieci neuronowej

Każdy węzeł z lewej strony reprezentuje zmienną objaśniającą x_i . Połączenia nazywane są wagami (*ang. weights*) i reprezentują one parametry θ_i . Węzeł z prawej strony oznaczony jako \hat{y} jest sumą iloczynów wag oraz wartości węzłów z prawej strony. Wtedy

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b & \theta_1 & \theta_2 & \dots & \theta_p \end{bmatrix} = b + x_1\theta_1 + x_2\theta_2 + \dots + x_p\theta_p = b + \sum_{i=1}^p x_i\theta_i,$$

co jest równoważne omawianemu modelowi regresji liniowej. Węzły sieci nazywane są neuronami, a wyraz wolny modelu b nazywany jest biasem (*ang. bias*).

W łatwy sposób możemy rozbudować ten model do regresji liniowej wielu zmiennych. Predykcją modelu nie będzie jak do tej pory jedna wartość \hat{y} , tylko wektor wartości $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_q$, który oznaczać będziemy jako \hat{Y} . Model ten został przedstawiony na rysunku 1.4.



Rysunek 1.4. Regresja liniowa wielu zmiennych jako model sieci neuronowej

Dla uogólnienia pojedyncze wagi modelu zapisywać będą jako w_{pq} , natomiast macierz wag jako \mathbf{W} . Algebraicznie zapisaliśmy ten model jako

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1q} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1p} \\ b_2 & w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_q & w_{q1} & w_{q2} & \dots & w_{qp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \\ \vdots \\ h_q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \vdots \\ \hat{y}_q \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} + \mathbf{XW} = \hat{\mathbf{Y}},$$

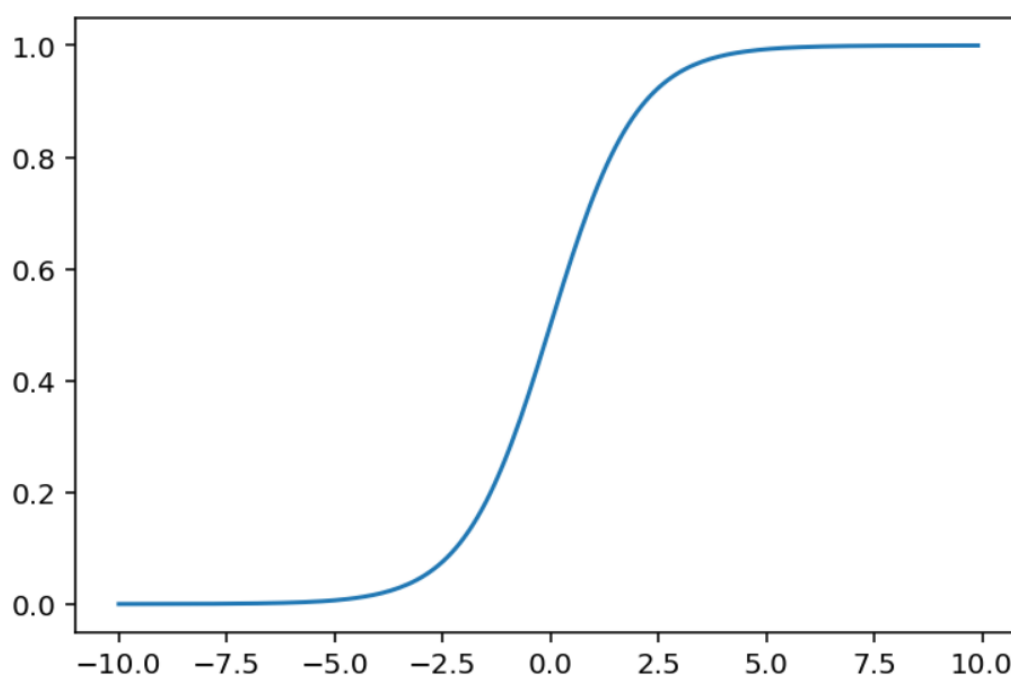
gdzie p jest liczbą zmiennych niezależnych, q jest liczbą zmiennych zależnych, \mathbf{X} jest rozszerzonym do macierzy o rozmiarach $q \times p$ wektorem zmiennych objaśniających, w taki sposób że $x_{i1} = x_{i2} = \dots = x_{ip}$ dla $i = 1, 2, \dots, q$, \mathbf{W} jest macierzą wag o rozmiarach $p \times q$, natomiast \mathbf{b} jest sumą wyrazów wolnych b_1, \dots, b_q . Możemy zauważyć, że model dla wielu zmiennych jest wieloma modelami dla jednej zmiennej, gdzie każdy model operuje na tych samych danych wejściowych. Taki model może być uznany za sieć neuronową i nazywany jest perceptronem.

1.4. Funkcje aktywacji

Omawiany model służy rozwiązywaniu problemu regresji, ponieważ wartości predykcji nie są uregulowane i mogą przyjmować wartości z \mathbb{R} . W celu przekształcenia tego modelu, aby móc go wykorzystać do rozwiązania problemu klasyfikacji, należy dodatkowo na otrzymanym wektorze $\hat{\mathbf{Y}}$ zastosować pewną funkcję, która przekształci wynik. W tym celu używamy funkcji aktywacji (*ang. activation function*). Istnieje wiele różnych funkcji aktywacji, a każda posiada inną charakterystykę i wpływ na model. Najpopularniejszą grupą funkcji są funkcje sigmoidalne (*ang. sigmoid functions*). Jedną z nich jest funkcja logistyczna (*ang. logistic curve*) postaci

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

oraz wykresie przedstawionym na rysunku 1.5



Rysunek 1.5. Funkcja logistyczna

Funkcja logistyczna ma pewne użyteczne właściwości, które pozwolą kontrolować wartości węzłów oraz rzutować wartości z całego \mathbb{R} do wartości z przedziału $(0, 1)$. Dzięki tej właściwości funkcja logistyczna jest często używana, aby otrzymać prawdopodobieństwo wystąpienia pewnego zdarzenia. Dodatkowo funkcja logistyczna szybko przyjmuje wartości skrajne, co oznacza że dla

bardzo dużych wartości ujemnych i bardzo dużych wartości dodatnich funkcja staje się mało wrażliwa na zmiany wartości wraz ze zmianą wartości argumentu [5].

W ten sposób możemy w łatwy sposób zmienić model regresji liniowej na model regresji logistycznej.

$$\sigma(\mathbf{b} + \mathbf{XW}) = \hat{\mathbf{Y}}.$$

W dalszych częściach pracy, kiedy będę używał funkcji aktywacji nie wskazując na konkretną funkcję, będę wykorzystywał oznaczenie $AF(x)$.

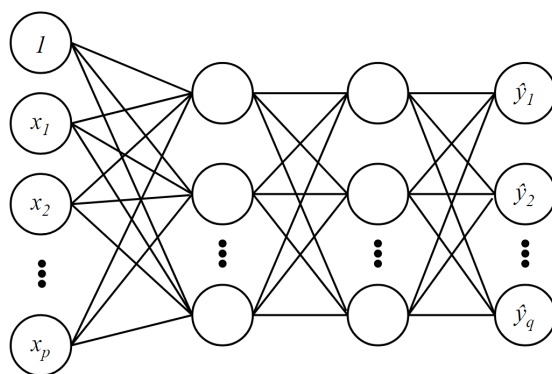
1.5. Wielowarstwowe sieci neuronowe

Model omawiany wcześniej może posłużyć jako podstawowy element do budowania bardziej skomplikowanych modeli. Aby to zrobić, należy potraktować otrzymany wektor $\hat{\mathbf{Y}}$ jako wektor wejściowy do następnego podstawowego modelu. Składając ze sobą wiele perceptronów w jeden model, tworzymy warstwy (*ang. layers*) sieci neuronowej.

Wyróżniamy trzy rodzaje warstw:

- warstwę wejściową (*ang. input layer*), która jest pierwszą warstwą modelu,
- warstwę wyjściową (*ang. output layer*), która jest ostatnią warstwą modelu,
- warstwy ukryte (*ang. hidden layer*), które są warstwami pomiędzy warstwą wejściową i wyjściową.

Na rysunku 1.6 przedstawiono sieć posiadającą warstwę wejściową, dwie warstwy ukryte oraz warstwę wyjściową.



Rysunek 1.6. Przykład modelu wielowarstwowej sieci neuronowej

Tego typu modele nazywane są wielowarstwowymi sieciami neuronowymi (*ang. multi layer neural networks*). O głębokich sieciach neuronowych (*ang.*

deep neural networks) mówimy, gdy posiadają przynajmniej trzy warstwy ukryte. Istnieje wiele różnych architektur głębokich sieci neuronowych, które wykorzystują te podstawowe koncepcje i rozszerzają je o dodatkowe warstwy, połączenia, funkcje aktywacji czy neurony o specjalnych właściwościach.

1.5.1. Jednokierunkowe sieci neuronowe

Jednokierunkowe sieci neuronowe (*ang. feedforward neural networks*) są to najprostsze sieci neuronowe, które wprost czerpią z omówionych wcześniej podstawowych warstw. Możemy się również spotkać z nazwą wielowarstwowy perceptron (*ang. multi layer perceptron - MLP*) ze względu na fakt, że jest zbudowany z wielu perceptronów zaprezentowanych w rozdziale 1.3. Działają one w taki sposób, że zasila się je danymi do warstwy wejściowej, następnie sukcesywnie wykonuje się obliczenia do momentu dotarcia do końca sieci. Każdy krok z warstwy $k - 1$ do warstwy k obliczany jest zgodnie ze wzorem [1]

$$\mathbf{X}_k = AF(\mathbf{b}_k + \mathbf{W}_k \mathbf{X}_{k-1}).$$

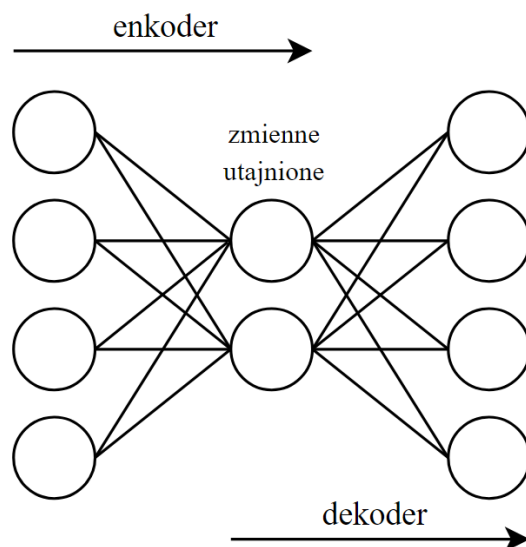
Propagacja wsteczna błędu

Kiedy używamy jednokierunkowych sieci neuronowych, zasilamy je danymi wejściowymi x ostatecznie otrzymując predykcję \hat{y} . Taki sposób działania nazywa się propagacją wprzód (*ang. forward propagation*). Podczas uczenia sieci kontynuuje się ten proces obliczając koszt $J(h)$. Propagacja wsteczna (*ang. back-propagation*) pozwala na przepływ informacji od funkcji kosztu wstecz sieci neuronowej, aby ostatecznie obliczyć gradient. Zasada działania algorytmu propagacji wstecznej błędu polega na sukcesywnym aktualizowaniu wag i biasów oraz przesyłaniu wstecz po warstwach sieci. Dzięki temu jesteśmy w stanie wyuczyć sieć oraz obliczyć optymalne wagi i biasy dla całej sieci neuronowej.

1.5.2. Autoenkoder

Autoenkoder jest szczególnym przypadkiem sieci neuronowej. Posiada jedną warstwę ukrytą, a rozmiar warstwy wejściowej musi być równy rozmiarowi warstwy wyjściowej, tworząc w ten sposób symetryczną sieć, której kształt przypomina klepsydre. Przykład autoenkodera przedstawiono na rysunku 1.7.

Podczas uczenia autoenkodera przedstawia się dane wejściowe jako cel. W ten sposób ta architektura stara się odtworzyć funkcje identycznościowe. Zadanie nie jest trywialne jak mogłoby się wydawać, ponieważ zazwyczaj ukryta warstwa jest mniejszego rozmiaru niż dane wejściowe. Z tego względu autoenkoder jest zmuszony do wydobycia istotnych cech danych wejściowych, skompresowania, a następnie jak najwierniejszego ich odtworzenia. Część kompresująca dane nazywana jest enkoderem, natomiast część dekompresująca dekode-



Rysunek 1.7. Przykład modelu autoenkodera

rem. Cechy, które zostały odkryte przez autoenkoder nazywane są zmiennymi utajnionymi (*ang. latent variables*). Zarówno enkoder jak i dekodery można wyodrębnić z autoenkodera i wykorzystywać go jako osobną sieć neuronową.

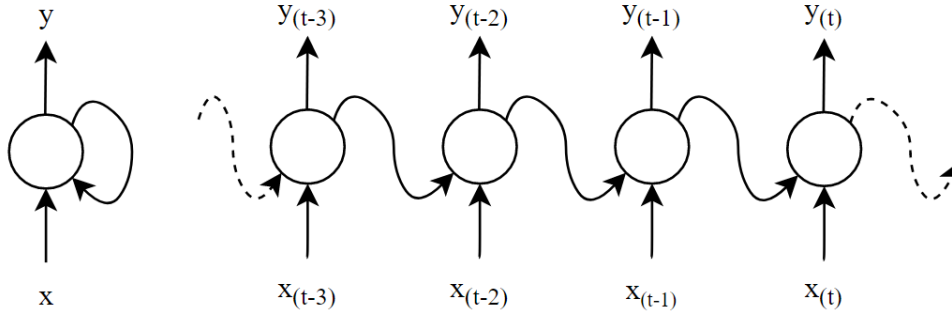
Ciekawą cechą dekodera jest jego generatywny charakter, ponieważ dostarczając zupełnie nowe informacje jako zmienne wejściowe, dekodery tworzą je na podobieństwo danych na, których został nauczony.

1.5.3. Rekurencyjne sieci neuronowe

Rekurencyjne sieci neuronowe (*ang. recurrent neural networks; RNN*) w uproszczeniu są to MLP posiadające pamięć. Wykorzystywane są do analizowania i przewidywania sekwencji wartości uporządkowanych w czasie. Rekurencyjne sieci neuronowe znalazły zastosowanie w przetwarzaniu języka naturalnego, np. tłumaczenia na różne języki świata. Potrafią poradzić sobie z różnej długości sekwencjami od krótkich zawierających kilka elementów do bardzo długich jak próbki audio, czy tekst zawierający dziesiątki tysięcy kroków czasu.

Rekurencyjne sieci neuronowe działają podobnie do omawianych w rozdziale 1.5.1 sieci jednokierunkowych z tym wyjątkiem, że informacja płynie również wstecz sieci. Jeden neuron sieci RNN otrzymuje dane wejściowe $x(t)$, wytwarza dane wyjściowe $y(t)$, a następnie wysyła te dane wyjściowe z powrotem do samego siebie. W ten sposób neuron RNN posiada dwa wejścia $x(t)$ oraz $y(t-1)$.

Możemy również zaprezentować sieć RNN w postaci odwiniętej w czasie (*ang. unrolled through time*) tak jak zaprezentowano to na rysunku 1.8.



Rysunek 1.8. Rekurencyjny neuron (po lewej) odwinięty w czasie (po prawej)

Gdyby rozważyć całą warstwę neuronów tego typu, wtedy warstwa przyjmowała by dwie macierze wag \mathbf{W}_x oraz \mathbf{W}_y . Dane wyjściowe całej warstwy zostaną obliczone wtedy zgodnie ze wzorem

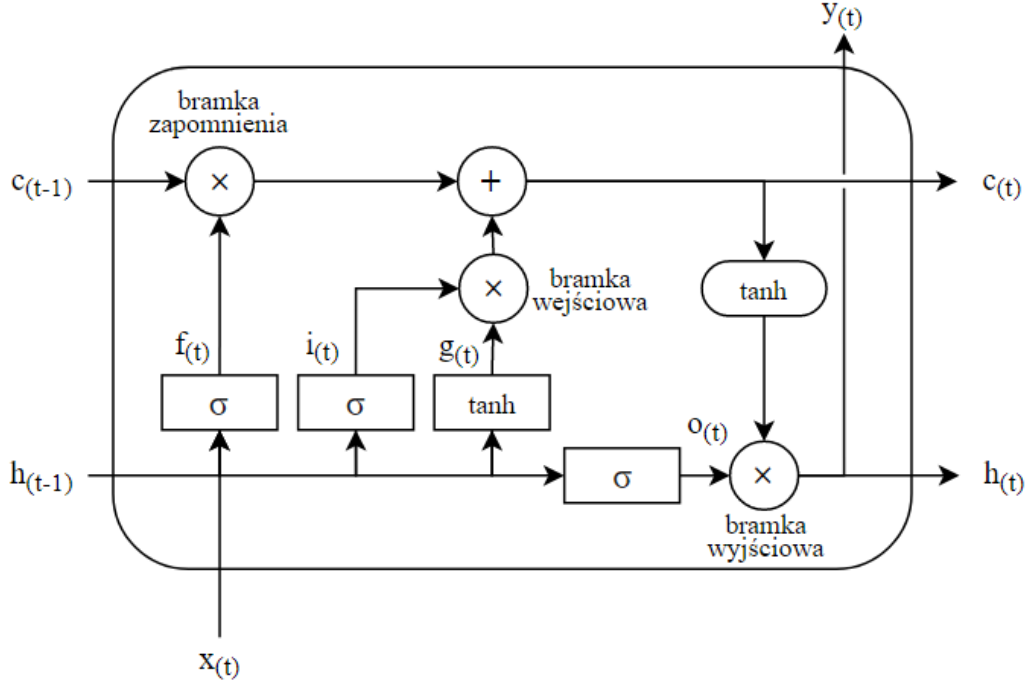
$$y_{(t)} = AF(\mathbf{W}_x^\top x_{(t)} + \mathbf{W}_y^\top y_{(t-1)} + b).$$

Aby wytrenować sieć neuronową stosuje się propagację wsteczną w czasie (*ang. backpropagation through time; BPTT*). Polega ona na odwinięciu sieci RNN, a następnie zastosowania zwykłej metody wstecznej propagacji [4].

1.5.4. LSTM

Komórki LSTM (*ang. long-short term memory*) są rozszerzeniem neuronów sieci rekurencyjnych. Pozwalają wykrywać zależności w danych w długim okresie. Posiadają dwa wektory opisujące stan neuronu. Wektor $h_{(t)}$ określa stan krótkookresowy i wektor $c_{(t)}$ określa stan długookresowy.

Główny pomysł na funkcjonowanie komórek LSTM był taki, aby sieć sama mogła się nauczyć jakie informacje są istotne i je przechować, a które informacje można pominąć, zapomnieć. Schemat komórki LSTM przedstawiono na rysunku 1.9. Aby to osiągnąć powstała idea bramek (*ang. gates*) oraz kontrolerów bramek (*ang. gate controllers*). W komórce LSTM wyróżniamy trzy bramki. Bramkę zapomnienia (*ang. forget gate*) sterowaną przez $f_{(t)}$, bramkę wejściową (*ang. input gate*) sterowaną przez $i_{(t)}$ oraz bramkę wyjściową (*ang. output gate*) sterowaną przez $o_{(t)}$. Przepływ danych w komórce LSTM zaczyna w miejscu, gdzie wektor wejściowy $x_{(t)}$ i poprzedni krótkoterminowy stan $h_{(t-1)}$ trafiają do czterech warstw. Główną warstwą jest ta zwracająca $g_{(t)}$. W podstawowej komórce RNN jest tylko ta warstwa. Pozostałe trzy warstwy po przejściu



Rysunek 1.9. Komórka LSTM

przez funkcje logistyczne trafiają do bramek. Bramka zapomnienia kontroluje, które informacje z długookresowego stanu $c_{(t-1)}$ powinny zostać wykasowane. Bramka wejściowa kontroluje jakie informacje z $g_{(t)}$ powinny zostać przekazane dalej i dodane do następnego stanu długookresowego $c_{(t)}$. Bramka wyjściowa odpowiada za wybranie odpowiednich elementów z stanu długookresowego i przekazanie ich następnym kroku. Wynik komórki zostaje przekazany do wyjścia komórki $y_{(t)}$ oraz jako następny stan krótkoterminowy $h_{(t)}$.

Kolejne etapy komórki LSTM obliczane są zgodnie z poniższymi wzorami:

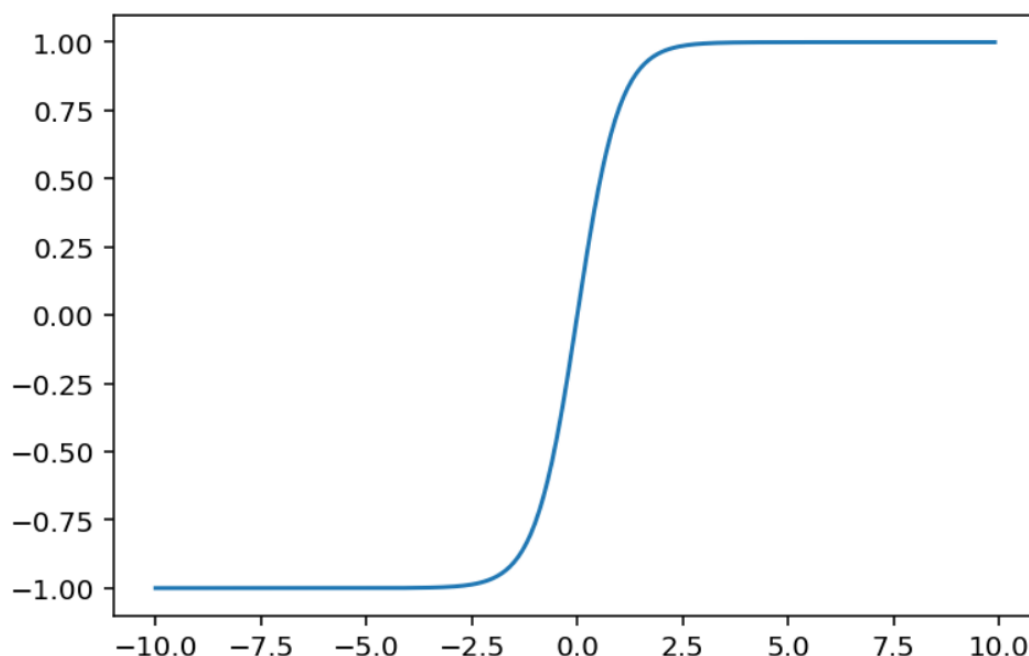
$$\begin{aligned}
 i_{(t)} &= \sigma(\mathbf{W}_{xi}^\top x_{(t)} + \mathbf{W}_{hi}^\top h_{(t-1)} + b_i), \\
 f_{(t)} &= \sigma(\mathbf{W}_{xf}^\top x_{(t)} + \mathbf{W}_{hf}^\top h_{(t-1)} + b_f), \\
 o_{(t)} &= \sigma(\mathbf{W}_{xo}^\top x_{(t)} + \mathbf{W}_{ho}^\top h_{(t-1)} + b_o), \\
 g_{(t)} &= \tanh(\mathbf{W}_{xg}^\top x_{(t)} + \mathbf{W}_{hg}^\top h_{(t-1)} + b_g), \\
 c_{(t)} &= f_{(t)} \otimes c_{(t-1)} + i_{(t)} \otimes g_{(t)}, \\
 y_{(t)} &= h_{(t)} = o_{(t)} \otimes \tanh(c_{(t)}),
 \end{aligned}$$

gdzie \mathbf{W}_{xi} , \mathbf{W}_{xf} , \mathbf{W}_{xo} , \mathbf{W}_{xg} są to macierze wag dla każdej w czterech warstw połączonych z wektorem wejściowym $x_{(t)}$, \mathbf{W}_{hi} , \mathbf{W}_{hf} , \mathbf{W}_{ho} , \mathbf{W}_{hg} są to macierze wag dla każdej w czterech warstw połączonych z poprzednim krótkookresowym stanem $h_{(t-1)}$, a b_i , b_f , b_o , b_g to biasy dla każdej z tych warstw [4].

Funkcja \tanh to tangens hiperboliczny, jedna z funkcji sigmoidalnych. Wykres funkcji \tanh został przedstawiony na rysunku 1.10

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

To co różni funkcję \tanh od σ to zakres przyjmowanych wartości. Tangens hiperboliczny przyjmuje wartości z przedziału $(-1, 1)$.



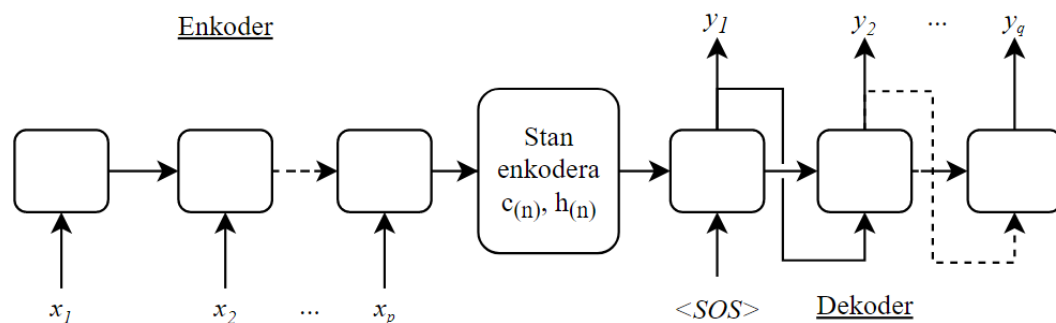
Rysunek 1.10. Tangens hiperboliczny

1.5.5. Sequence-to-sequence

Model w architekturze sequence-to-sequence (*ang. seq2seq*) został wymyślony z myślą o tłumaczeniu maszynowym języków, ale zastosowanie dla niego znaleziono również w rozpoznawaniu mowy, opisywaniu wideo, czy tworzeniu chatbotów. Jego główną zaletą jest przetwarzanie sekwencji elementów o różnych długościach. Jest to naturalne, ponieważ tłumacząc z języka na język często tą samą sentencję można wyrazić różną liczbę słów. Dla przykładu

zdanie po polsku „Co dzisiaj robisz?” zawiera trzy słowa, natomiast przetłumaczone na język angielski „What are you doing today?” zawiera pięć słów. Nie można tego osiągnąć zwykłą siecią LSTM, dlatego model seq2seq został zaprojektowany, aby móc go zastosować do tego typu problemów [7].

Model sequence-to-sequence ma dwie części, enkoder i dekodery. Obie części są w zasadzie dwiema zupełnie osobnymi modelami, połączonymi ze sobą w jedną sieć. Schemat modelu sequence-to-sequence przedstawiono na rysunku 1.11. Zadaniem enkodera jest wydobywanie z wektora wejściowego najistotniejszych informacji i skompresowanie ich tak jak zostało to opisane w rozdziale 1.5.2. Następnie wektor stanu enkodera jest przekazywany do dekodera, który na jego podstawie rekonstruuje sekwencję.



Rysunek 1.11. Architektura modelu sequence-to-sequence

Wiele szczegółów technicznych dotyczących modelu sequence-to-sequence przedstawię w dalszych rozdziałach pracy.

Wprowadzenie do teorii muzyki

W tym rozdziale przedstawię podstawowe koncepcje muzyczne oraz sposoby reprezentacji muzyki.

2.1. Podstawowe koncepcje muzyczne

2.1.1. Dźwięk muzyczny

Drgania powietrza z otoczenia człowieka są przetwarzane w mózgu i rozumiane jako dźwięki. Takie drgania nazywamy falą dźwiękową. Dźwięk muzyczny jest to fala dźwiękowa, którą wytwarza instrument muzyczny. Dźwięk muzyczny charakteryzuje się trzema podstawowymi parametrami:

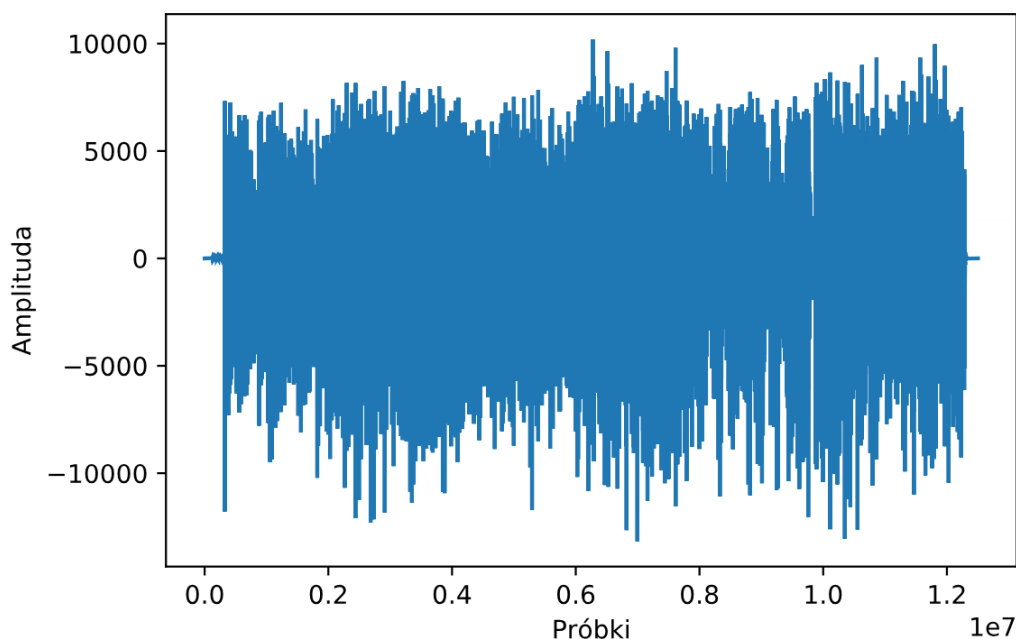
- wysokością (*ang. pitch*) - jest to częstotliwość drgań wyrażona w hercach. Im większa częstotliwość tym dźwięk jest rozumiany jako wyższy. Zakres słyszalny dla człowieka wynosi od 20Hz do 20kHz.
- głośność (*ang. velocity*) - jest to amplituda drgań fali dźwiękowej. Im większa amplituda, tym dźwięk jest odczuwany jako głośniejszy,
- długość (*ang. duration*) - jest to czas z jakim dźwięk wybrzmiewa, np. 2 sekundy.

2.1.2. Sygnał dźwiękowy

W rzeczywistości utwór muzyczny jest zazwyczaj kombinacją wielu fal dźwiękowych o różnych charakterystykach i nazywany jest sygnałem dźwiękowym. Wizualizację sygnału dźwiękowego przedstawiono na Rysunku 2.1

2.1.3. Zapis nutowy

Reprezentacja muzyki jako sygnału dźwiękowego przechowuje informacje o dokładnym brzmieniu danego utworu tzn. jakie drgania należy wytworzyć, aby móc odtworzyć muzykę. Taki zapis nie informuje nas o instrumentach, które zostały użyte ani jakie wysokości i długości dźwięków zostały zagrane. Dlatego ludzkość na przestrzeni wieków opracowała abstrakcyjne obiekty, które reprezentują utwór w czytelny dla człowieka sposób.



Rysunek 2.1. Przykład przebiegu fali dźwiękowej

Tempo

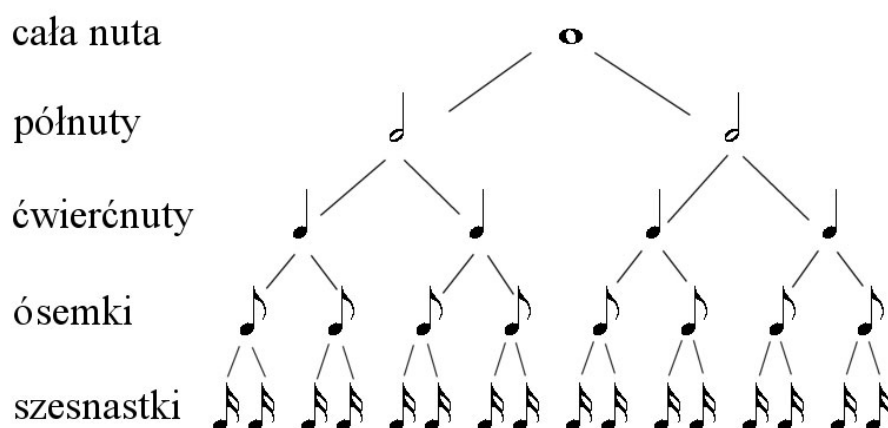
W muzyce symbolicznej tempo informuje nas o prędkości utworu. W muzyce klasycznej stosowało się opisowy sposób dostosowywania tempa np. Allegro - Szybko lub Adagio - wolno. Jak można szybko stwierdzić są to zwroty subiektywne i nie wyznaczają tempa jednoznacznie. Obecnie wyraża się tempo w liczbie uderzeń na minutę (*ang. beats per minute; BPM*). I tak Allegro jest to od 120 do 168 BPM a Adagio od 66 do 76 BPM [11].

Nuta

Nuta jest to graficzna reprezentacja dźwięku muzycznego. Informuje nas ona o dwóch parametrach dźwięku, wysokości oraz długości dźwięku. Długość dźwięku nazywa się jej wartością. Podstawową wartością nuty jest ćwierćnuta, odpowiada ona jednemu uderzeniu (*ang. beat*). Ta wartość pozwala nam zrozumieć jak długo należy wygrywać nutę relatywnie do pozostałych nut w utworze. Jeśli obok siebie ustawimy dwie nuty o wartościach ćwierćnuty i ósemki, wiemy że tę drugą nutę powinniśmy zagrać dwa razy krócej niż pierwszą. Aby wiedzieć dokładnie jak długo powinna wybrzmiewać nuta musimy odwołać się do tempa utworu. Dla przykładu w tempie 60 BPM w ciągu minuty zagramy dokładnie 60 ćwierćnut. Kolejne wartości tworzone poprzez sumowanie lub podział długości ćwierćnuty. Półnuta trwa tyle co dwie ćwierćnuty, cała nuta tyle co dwie

półnuty, ósemka trwa połowę czasu ćwierćnuty, a szesnastka połowę ósemki itd. Zostało to pokazane na rysunku 2.2.

PODZIAŁ REGULARNY WARTOŚCI NUT



Rysunek 2.2. Podział wartości nut¹

Tak jak pisałem wcześniej wysokość dźwięku jest to częstotliwość drgań fali dźwiękowej wyrażona w hercach. Obecnie używa się systemu równomiernie temperowanego, który wyróżnia 12 dźwięków równo od siebie oddalonych. Są to dźwięki C, C#/D♭, D, D#/E♭, E, F, F#/G♭, G, G#/A♭, A, A#/B oraz H.

Każdej literze przypisana jest częstotliwość zgodnie z Tabelą 2.1

Dźwięk	Częstotliwość
C_4	261,6
D_4	293,7
E_4	329,6
F_4	349,2
G_4	391,9
A_4	440,0
H_4	493,9

Tabela 2.1. Dźwięki symboliczne oraz ich częstotliwości

¹ infomusic.pl/poradnik/46934,poradnik-teoria-muzyki-rytm
5 kwietnia 2020 12:46

W zapisie nutowym, aby nucie nadać wysokość umieszcza się ją w odpowiednim miejscu na pięciolinii. Przedstawione powyżej dźwięki zapisaliśmy w taki sposób jak przedstawiono na Rysunku 2.3



Rysunek 2.3. Zapis nut na pięciolinii²

Interwał

O interwałach mówimy kiedy porównujemy ze sobą dwie nuty. Interwał jest to odległość między nutami liczona w półnutach. Półnuta jest to najmniejsza odległość między nutami we współczesnej notacji muzycznej. Oktawa jest podzielona na 12 równych części. Pomiedzy dźwiękami C i D jest odległość dwóch półnut, natomiast między F oraz F# jest odległość jednej półnuty. Dla ludzkiego ucha w celu rozpoznania melodii istotniejsze są interwały między kolejnymi nutami niż konkretna wysokość dźwięków.

Oktawa

Oktawą nazywamy zestaw ośmiu nut od C do H. Podane w Tabeli 2.1 częstotliwości nut odpowiadają dźwiękom w oktawie czwartej. Dlatego w indeksie dolnym nuty widnieje liczba 4. Aby utworzyć dźwięk, np. A_5 należy pomnożyć częstotliwość dźwięku A_4 razy dwa natomiast, aby utworzyć dźwięk A_3 , należy tę częstotliwość podzielić przez dwa.

$$A_5 = 2 * 440\text{Hz} = 880\text{Hz},$$

$$A_3 = 1/2 * 440\text{Hz} = 220\text{Hz}.$$

W ten sposób możemy stworzyć nieskończenie wiele oktaw, jednak w rzeczywistości używa się nut od C0 do C8.

Akord

Gdy w jednym momencie zabrzmiały dwie lub więcej różnych nut, wtedy mówimy o akordzie. Akord potrafi dodać emocje do brzmienia całego utworu.

Skala

Skala szereg dźwięków ułożonych według stałego schematu interwałów. Współcześnie wyróżniamy dwa rodzaje skal, durową (Dur) oraz molową (Mol).

² amplitudaschool.weebly.com/lekcja-11 5 kwietnia 2020 13:24

Skala durowa odbierana jest przez słuchacza jako „wesola”, a skala molowa jako „smutna”. Skalę tworzy się wybierając dowolny dźwięk początkowy, który będzie pierwszym stopniem skali. Następnie dobieramy kolejne dźwięki zgodnie ze schematem skali. Skalę durową tworzymy według następującego schematu

2 2 1 2 2 2 1.

Schemat przedstawia liczbę półnut między kolejnymi dźwiękami skali. Dla przykładu skala C-Dur składa się z dźwięków C, D, E, F, G, A i H.

2.2. Cyfrowa reprezentacja muzyki symbolicznej

2.2.1. Standard MIDI

Standard MIDI (ang. Musical Instrument Digital Interface) został stworzony w 1983, aby umożliwić synchronizację i wymianę informacji między elektronicznymi urządzeniami muzycznymi takimi jak syntezatory, keyboardy czy sekwencery. W późniejszych latach został on zaadaptowany do środowiska komputerowego jako cyfrowa reprezentacja muzyki symbolicznej.

```
note_on channel=0 note=48 velocity=100 time=0
note_on channel=0 note=53 velocity=100 time=0
note_on channel=0 note=60 velocity=100 time=0
note_on channel=0 note=48 velocity=0 time=220
note_on channel=0 note=48 velocity=100 time=0
note_on channel=0 note=53 velocity=0 time=0
note_on channel=0 note=55 velocity=100 time=0
note_on channel=0 note=60 velocity=0 time=0
```

Rysunek 2.4. Fragment protokołu MIDI

Wiadomości

Plik MIDI zawiera zestaw wiadomości przesyłanych w czasie rzeczywistym o każdej nucie w utworze. Dwie wiadomości, które są dla nas szczególnie istotne to:

- note_on, który sygnalizuje, aby rozpocząć grać nutę,
- note_off, który sygnalizuje, aby zakończyć grać nutę.

Dla przykładu wiadomość:

note_on channel 0 note 48 velocity 100 time 0

oznacza, że na kanale 0 należy zagrać dźwięk nr 48 z głośnością 100 w momencie 0 utworu. Nie informuje nas on jednak o długości trwania dźwięku. Aby zakończyć dźwięk należy wysłać wiadomość:

note_off, channel 0, note 48, velocity 100, time 24.

Zwróćmy uwagę, że aby ustalić wartość nuty potrzebujemy odebrać dwie wiadomości. Różnica między parametrami *time* informuje nas o długości nuty. W tym przypadku jest to 24 co oznacza ćwierćnutę.

Rozdzielczość

Czas w MIDI jest reprezentowany jako liczba naturalna i jest on zależny od ustalonego tempa utworu. Standardowa rozdzielczość pliku MIDI to 24. Oznacza to, że jedna jednostka czasu odpowiada jednej dwudziestej czwartej jednego uderzenia.

Kanały

Plik MIDI posiada 16 kanałów numerowanych od 0 do 15. Każdy kanał odpowiada instrumentowi lub ścieżce. Kanał 9 jest kanałem zarezerwowanym na instrumenty perkusyjne.

Nuty

Nuty w formacie MIDI opisane są kolejnymi cyframi naturalnymi w przedziale od 0 do 127. Odpowiada to dźwiękom od C_0 do C_8 . Dla przykładu nuta 69 odpowiada A_4 , a nuta 47 odpowiada B_2 .

Wyjątkiem są nuty z kanału dziewiątego, gdzie istnieją tylko nuty z zakresu od 35 do 81 i każda nuta odpowiada innemu elementowi perkusyjnej, np. 35 to stopa (*ang. kick*), a 37 to werbel (*ang. snare*).

Głośność

Za głośność dźwięku odpowiada parametr *velocity*, który jest liczbą z przedziału od 0 do 127. Im większa jest wartość tym głośniejsze brzmi dźwięk.

Program

Program w kontekście standardu MIDI oznacza instrument, który ma zagrać nuty. W standardzie GM (*ang. General MIDI*) jest 16 grup instrumentów, a w każdej z nich znajduje się po 8 instrumentów. Są to pianina, chromatyczne perkusje, organy, gitary, basy, instrumenty smyczkowe, zestawy instrumentów, instrumenty dmuchane blaszane, instrumenty dmuchane drewniane, flety, syntezatory prowadzące, syntezatory uzupełniające, efekty syntetyczne, instrumenty etniczne, perkusjonalia i efekty dźwiękowe. Szczegółowa rozpiska została przedstawiona na rysunku 2.5

	Piano	Bass	Lead	Synth FX
	1 - Piano 1 2 - Piano 2 3 - Piano 3 4 - Honky-Tonk Piano 5 - Electric Piano 1 6 - Electric Piano 2 7 - Harpsichord 8 - Clav.	33 - Acoustic Bass 34 - Fingered Bass 35 - Picked Bass 36 - Fretless Bass 37 - Slap Bass 1 38 - Slap Bass 2 39 - Synth Bass 1 40 - Synth Bass 2	65 - Soprano Sax 66 - Alto Sax 67 - Tenor Sax 68 - Baritone Sax 69 - Oboe 70 - English Horn 71 - Bassoon 72 - Clarinet	97 - Ice Rain 98 - Soundtrack 99 - Crystal 100 - Atmosphere 101 - Brightness 102 - Goblin 103 - Echo Drops 104 - Star Theme
	Chromatic percussion	Strings/Orchestra	Pipe	Ethnic
	9 - Celesta 10 - Glockenspiel 11 - Music Box 12 - Vibraphone 13 - Marimba 14 - Xylophone 15 - Tubular Bell 16 - Santur	41 - Violin 42 - Viola 43 - Cello 44 - Contrabass 45 - Tremolo Strings 46 - Pizzicato 47 - Harp 48 - Timpani	73 - Piccolo 74 - Flute 75 - Recorder 76 - Pan Flute 77 - Bottle Blow 78 - Shakuhachi 79 - Whistle 80 - Ocarina	105 - Sitar 106 - Banjo 107 - Shamisen 108 - Koto 109 - Kalimba 110 - Bagpipe 111 - Fiddle 112 - Shanai
Organ	Ensemble	Synth Lead	Percussive	
17 - Organ 1 18 - Organ 2 19 - Organ 3 20 - Church Organ 21 - Reed Organ 22 - Accordion 23 - Harmonica 24 - Bandoneon	49 - Strings 50 - Slow Strings 51 - Synth Strings 1 52 - Synth Strings 2 53 - Choir Aahs 54 - Voice Oohs 55 - Synth Voice 56 - Orchestra Hit	81 - Square Wave 82 - Saw Wave 83 - Synth Calliope 84 - Chiffer Lead 85 - Charang 86 - Solo Vox 87 - 5th Saw Wave 88 - Bass & Lead	113 - Tinkle Bell 114 - Agogo 115 - Steel Drums 116 - Woodblock 117 - Taiko 118 - Melo Tom 119 - Synth Drums 120 - Reverse Cymbal	
Guitar	Brass	Synth Pad	Sound FX	
25 - Nylon-str. Guitar 26 - Steel-str. Guitar 27 - Jazz Guitar 28 - Clean Guitar 29 - Muted Guitar 30 - Overdrive Guitar 31 - Distortion Guitar 32 - Guitar Harmonics	57 - Trumpet 58 - Trombone 59 - Tuba 60 - Muted trumpet 61 - French Horns 62 - Brass 1 63 - Synth Brass 1 64 - Synth Brass 2	89 - Fantasia 90 - Warm Pad 91 - Polysynth 92 - Space Voice 93 - Bowed Glass 94 - Metal Pad 95 - Halo Pad 96 - Sweep Pad	121 - Guitar FretNoise 122 - BreathNoise 123 - Seashore 124 - Bird 125 - Telephone 126 - Helicopter 127 - Applause 128 - GunShot	

Rysunek 2.5. Lista programów w standardzie General MIDI³

Ścieżka

Ścieżka (*ang. track*) grupuje nuty, aby podzielić utwór muzyczny na różne instrumenty lub partie. Protokół MIDI pozwala, aby grać wiele ścieżek dźwiękowych jednocześnie. Wtedy mówimy o muzyce polifonicznej lub multiinstrumentalnej.

³ alchetron.com/General-MIDI#general-midi-d016a071-b750-46c2-8828-926e6d2aa12-resize-750.png 16 czerwca 2020 8:23

Projekt

W tym rozdziale opiszę szczegóły działania modelu, który przygotowałem. Najpierw przedstawię pomysł na model, opiszę szczegóły techniczne dotyczące przygotowania danych uczących dla modelu. Następnie zdefiniuję i opiszę architekturę sequence-to-sequence. Fragmenty kodu zamieszczone w pracy zostały napisane w języku Python.

3.1. Koncepcja

Celem tej pracy było wykonanie modelu, który przy użyciu głębokiego uczenia będzie w stanie generować krótkie klipy multiinstrumentalne. Zainspirował mnie sposób w jaki tworzy się muzykę w zespole. W przeciwieństwie do muzyki tworzonej przez jednego kompozytora, w zespole każda partia tworzona jest przez muzyka grającego na danym instrumencie. Przykładowy sposób tworzenia utworu w zespole, np. rockowym wygląda jak następuje. Jedna osoba tworzy (generuje) pierwszą partię muzyczną, np. partię na gitary. Ta partia została stworzona bez odniesienia do innych członków zespołu. Następnie taka partia zostaje przedstawiona zespołowi. Każdy z członków zespołu musi teraz stworzyć swoje partie w taki sposób, aby pasowały one muzycznie do pierwszej partii. W ten sposób powstają nam zależności między partiami tworzącymi cały utwór.

Na podstawie tej idei postanowiłem opracować model składający się z wielu sieci neuronowych, każda z nich odpowiadać będzie jednej partii w utworze, muzykowi w zespole. Jedna z tych sieci będzie generatorem. Ta sieć powinna być skonstruowana w taki sposób, aby zainicjować partię muzyczną. Pozostałe będą dopasowywać swoje partie pod partię stwarzaną przez generator. Te sieci nazywać będę modelami akompaniujący. Dzięki temu jesteśmy w stanie stworzyć model wielu sieci, w którym następna sieć będzie produkować swoje partie na podstawie tego, co wygenerowała poprzednia.

Kluczowe było zauważenie podobieństwa między językiem naturalnym oraz muzyką. Zarówno zdanie jak i partia muzyczna składa się z sekwencji elementów rozmieszczonych w czasie. Elementy te są zależne od długoterminowego kontekstu oraz od tego jaki element był ustawiony wcześniej. Dla języka natu-

ralnego są to słowa, dla muzyki są to nuty i akordy. Dodatkowo pomyślałem, że różne instrumenty można porównać do różnych języków świata. Wtedy, aby stworzyć melodię, np. basu tak, żeby pasowała pod partię gitary należy przetłumaczyć „język” gitary na „język” basu. Do tłumaczeń języka naturalnego wykorzystuje się modele sequence-to-sequence, dlatego postanowiłem w modelu generowania muzyki wykorzystać właśnie tę architekturę. Dodatkowo modele sequence-to-sequence mają tę cechę, że liczba elementów sekwencji wejściowej może być inna niż liczba elementów sekwencji wyjściowej. Idealnie sprawdzi się w przypadku muzyki, ponieważ o długości trwania ścieżki muzycznej nie świadczy liczba nut tylko suma ich wartości.

3.2. Wstępne przygotowanie danych do treningu

3.2.1. Muzyczne słowo

Na potrzeby dostosowania danych muzycznych do koncepcji słów w zdaniu zakodowałem pojedyncze słowo muzyczne jako

$$((\text{zbiór wysokości}), \text{długość}).$$

W ten sposób byłem w stanie zakodować pojedyncze nuty i akordy.

Akord C-dur składający się z dźwięków C, E i G o długości ósemki zapisaaliśmy w następujący sposób

$$((60, 64, 67), 0.5).$$

Dzięki temu jesteśmy w stanie kodować melodię w sekwencję słów muzycznych. Tak skonstruowane dane mają niestety swoje negatywne aspekty. Nie da się w ten sposób zapisać partii, w której zostaje grana nowa nuta, gdy poprzednia jeszcze powinna brzmieć. Nasz zapis zakłada, że melodia jest grana element po elemencie i nowy element wymusza zakończenie poprzedniego. Nie przechowujemy również informacji o dynamice melodii (głośności). Rozszerzenie tego zapisu o informacje o głośności nie jest trudne i nie będzie wymagać przebudowy modelu, natomiast wraz ze wzrostem liczby możliwych „słów muzycznych” w słowniku i zwiększa złożoność obliczeniową. Zdecydowałem się na niewykorzystanie tych danych w generowaniu muzyki.

3.2.2. Konwersja MIDI na sekwencje słów muzycznych

Powszechny sposób przechowywania muzyki symbolicznej w formie cyfrowej to pliki *.mid lub *.midi, które przechowują informację o potoku wiadomości protokołu MIDI. Aby odczytać wiadomości z plików MIDI wykorzystałem

bibliotekę `pretty_midi`, która zawiera wiele funkcji pozwalających na edycję plików MIDI [9].

Aby otworzyć pliki MIDI za pomocą biblioteki `pretty_midi`, należy skorzystać z poniższej składni.

```
>>> import pretty_midi as pm
>>> midi_path = 'example.mid'
>>> midi = pm.PrettyMIDI(midi_path)
>>> melody = midi.instruments[0]
>>> melody.notes

[Note(start=18.873909, end=19.186408, pitch=71, velocity=110),
 Note(start=19.132529, end=19.471968, pitch=76, velocity=114),
 Note(start=19.396538, end=19.768304, pitch=80, velocity=111),
 Note(start=19.655158, end=19.951494, pitch=81, velocity=105),
 Note(start=19.913779, end=20.226278, pitch=80, velocity=99),
 Note(start=20.172399, end=20.452571, pitch=76, velocity=119),
 Note(start=20.431020, end=20.624985, pitch=71, velocity=115),
 Note(start=20.689640, end=20.975200, pitch=69, velocity=114),
 ...]
```

Dzięki bibliotece `pretty_midi` plik MIDI został odczytany i przechowany w obiekcie `PrettyMIDI`. Ten obiekt posiada atrybut `instruments`, który jest listą ścieżek pliku MIDI. Obiekt ścieżki posiada atrybut `notes`, który jest listą nut tej ścieżki. Możemy zobaczyć, że biblioteka `pretty_midi` zamieniła potok sygnałów protokołu MIDI na konkretne nuty posiadające parametry `start`, `end`, `pitch` oraz `velocity`. Aby otrzymać sekwencję danych w takim formacie w jakim potrzebujemy możemy zastosować na obiekcie `Instrument` poniższą funkcję.

```
def parse_pretty_midi_instrument(instrument, resolution,
    time_to_tick, key_offset):
    ''' arguments: a prettyMidi instrument object
        return: a custom SingleTrack object
    '''

    first_tick = None
    prev_tick = 0
    prev_note_length = 0
    max_rest_len = 4.0

    notes = defaultdict(lambda: [set(), set()])
    for note in instrument.notes:
        if first_tick == None:
            first_tick = 0

        tick = round_to_sixteenth_note(
            time_to_tick(note.start)/resolution)
```

```

    if prev_tick != None:
        act_tick = prev_tick + prev_note_lenth
        if act_tick < tick:
            rest_lenth = tick - act_tick
            while rest_lenth > max_rest_len:
                notes[act_tick] = [{-1},{max_rest_len}]
                act_tick += max_rest_len
                rest_lenth -= max_rest_len
            notes[act_tick] = [{-1},{rest_lenth}]

        note_lenth = round_to_sixteenth_note(
            time_to_tick(note.end-note.start)/resolution)

        if -1 in notes[tick][0]:
            notes[tick] = [set(), set()]

        if instrument.is_drum:
            notes[tick][0].add(note.pitch)
        else:
            notes[tick][0].add(note.pitch+key_offset)

        notes[tick][1].add(note_lenth)

        prev_tick = tick
        prev_note_lenth = note_lenth

    notes = [(tuple(e[0]), max(e[1])) for e in notes.values()]

    if instrument.is_drum:
        name = 'Drums'
    else :
        pm.program_to_instrument_class(instrument.program)

    return SingleTrack(name,
        instrument.program,
        instrument.is_drum,
        Stream(first_tick, notes))

```

Powyższa funkcja zamienia wartości absolutne czasu na wartości względne o ustalonej rozdzielczości przez plik MIDI. Dodatkowo zmniejsza szczegółowość i zaokrągla czas zagrania nuty po szesnastki. Gdy w tym samym momencie, czyli jeśli kilka nut posiada tę samą wartość start, zostają dodane do jednego słowa muzycznego, aby utworzyć akord. Pauzy są kodowane jako -1. Dodatkowo jeśli pauza trwa dłużej niż takt wtedy zostaje podzielona na mniejsze części o długości `max_rest_len`. Funkcja zwraca obiekt `SingleTrack`, który jest obiektem stworzonym, aby poza nutami przechowywać inne istotne informacje na temat ścieżki. Będą one istotne w następnych częściach przetwarzania danych. Ostatecznie sekwencje słów muzycznych przechowane są w `notes`.

```
>>> resolution = midi.resolution
>>> time_to_tick = midi.time_to_tick
>>> instrument = melody

>>> single_track = parse_pretty_midi_instrument(instrument,
resolution, time_to_tick, key_offset=0)
>>> single_track.stream.notes

[((-1,), 4.0),
 ((-1,), 0.5),
 ((71,), 0.5),
 ((76,), 0.75),
 ((80,), 0.75),
 ((81,), 0.5),
 ((80,), 0.5),
 ((76,), 0.5),
 ((71,), 0.5),
 ((69,), 0.5),
 ((68,), 0.5),
 ((69,), 0.25),
 ...]
```

3.2.3. Inne aspekty przygotowania danych

Po odczytaniu danych i konwersji ich do pożądanego formatu dane należy oczyścić. W mojej pracy zastosowałem kilka operacji, w celu zwiększenia muzycznego sensu danych.

Unormowanie skali

W muzyce istnieje pojęcie skali. Skala jest to zestaw nut, które dobrze ze sobą współgrają. Zostało to szerzej opisane w podrozdziale 2.1.3. W uczeniu maszynowym powoduje to realny problem, ponieważ piosenki wykorzystują różne skale i sieć neuronowa będzie preferować wybranie skali częściej używanej. Dodatkowo zmiana skali nie zmienia znacznie contentu muzycznego utworu, tj. nawet po zmianie skali melodii człowiek dalej jest w stanie ją rozpoznać. Zmiana wysokości wszystkich nut bez zmiany ich względnych interwałów nazywana jest transpozycją. Aby rozwiązać ten problem zaleca się rozszerzenie danych do wszystkich możliwych skal. W mojej pracy wykorzystałam jednak inne rozwiązanie. Zamiast rozszerzać zbiór danych sprowadziłem wszystkie ścieżki muzyczne do jednej skali C. Dzięki temu model przyłoży większą uwagę na rozumienie wzajemnych relacji, zamiast uczyć się pojęcia tonacji skali [1].

Podział na takty

Dłgie listy muzycznych słów zostały podzielone na takty (*ang. bars*) o odpowiedniej długości, domyślnie o długości 4, co odpowiada czterem ćwierćnotom. Dzięki temu utwór muzyczny zostanie podzielony na mniejsze sekwencje. Sekwencje te będą posiadały różną liczbę elementów, ale będą tak samo długie w kontekście muzycznym. Głównym celem takiego zabiegu, jest zapewnienie muzycznego sensu sekwenjom. Takt jest naturalnym podziałem dłuższych partii na krótsze.

3.2.4. Podział danych na dane wejściowe i wyjściowe

Na podstawie przetworzonych danych, należy przygotować dane wejściowe X i wyjściowe Y dla sieci neuronowych, aby przeprowadzić proces uczenia. W tym celu będziemy rozważać pary sekwencji (x, y) , gdzie $x \in X$ i $y \in Y$. Każda sekwencja zawierać będzie omówione wcześniej słowa muzyczne. W przygotowanym przeze mnie modelu, występują dwa rodzaje sieci neuronowych, sieć generująca oraz sieć akompaniująca.

Przygotowanie danych dla generatora

Model generatywny będzie tworzył partie muzyczne, na podstawie poprzednich sekwencji tego samego instrumentu. Weźmy partię muzyczną G , która jest uporządkowaną listą elementów g w czasie. Każdy element g jest taktem składających się ze słów muzycznych.

$$G = [g_1, g_2, g_n],$$

gdzie n jest liczbą taktów w partii muzycznej. Pary (x_t, y_t) tworzymy według poniżej reguły

$$\begin{aligned} x_t &= g_t, \\ y_t &= g_{t+1}, \end{aligned}$$

dla $t \in (1, n - 1)$.

Dzięki takiemu zdefiniowaniu danych uczących generator będzie uczył się jak powinien wyglądać następny takt na podstawie poprzedniego. W ten sposób będziemy w stanie wykorzystać model do generowania muzyki bez danych wejściowych. Wątek zostanie rozwinięty w dalszej części pracy.

Implementacja w Pythonie:

```
def get_data_seq2seq_melody(self, instrument_class,
                             x_seq_len=4):
    '''return a list of bars with content for every track
    with given instrument class for melody generation
    x_seq_len and y_seq_len'''
```



```

x previous sentence, y next sentence of the same melody line
'''

instrument_tracks =
    self.tracks_by_instrument[instrument_class]

for track_index in instrument_tracks:
    bars = self.tracks[track_index].stream_to_bars()
    bars_indexes_with_content =
        get_bar_indexes_with_content(bars)
    bars_with_content =
        [bars[i] for i in get_bar_indexes_with_content(bars)]

    x_seq = []
    y_seq = []
    for i in range(len(bars_with_content)-x_seq_len-1):
        _x_seq =
            [note for bar in bars_with_content[i:i+x_seq_len]
             for note in bar]
        _y_bar = bars_with_content[i+x_seq_len]
        x_seq.append(_x_seq)
        y_seq.append(_y_bar)

    return x_seq, y_seq

```

Przygotowanie danych dla akompaniamentu

Model akompaniujący będzie na podstawie partii instrumentu tworzyć partię na nowy instrument. Niech G , B będą sekcjami muzycznymi różnych instrumentów tej samej długości oraz niech

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= [g_1, g_2, \dots, g_k], \\ \mathbf{B} &= [b_1, b_2, \dots, b_k], \end{aligned}$$

wówczas pary dla zbioru uczącego tworzymy w następujący sposób

$$\begin{aligned} x_t &= g_t, \\ y_t &= b_t, \end{aligned}$$

dla $t \in (1, k)$. Istotne jest, aby każdy element ze zbioru taktów partii \mathbf{B} był rzeczywistą aranżacją tego instrumentu dla taktów partii \mathbf{G} oraz, aby między elementami g_t oraz b_t była muzyczna relacja.

Implementacja przedstawionej techniki w Pythonie.

```

def get_data_seq2seq_arrangment(self, x_instrument,
    y_instrument, bars_in_seq=4):

```

```

'''this method is returning a sequences of given length
   by rolling this lists of x and y for arrangement generation
   x and y has the same bar length, and represent the
   same musical phrase played mb different instruments (tracks)

'''
x_seq = []
y_seq = []
xBars, yBars =
self.get_common_bars_for_every_possible_pair(
    x_instrument, y_instrument)

for i in range(len(xBars) - bars_in_seq + 1):
    x_seq_to_add =
    [note for bar in
     xBars[i:i+bars_in_seq] for note in bar ]
    y_seq_to_add =
    [note for bar in
     yBars[i:i+bars_in_seq] for note in bar ]
    x_seq.append(x_seq_to_add)
    y_seq.append(y_seq_to_add)

return x_seq, y_seq

```

3.2.5. Inne aspekty przygotowania zbioru uczącego

Oczyszczenie danych

W przygotowaniu danych dla modelu ważne jest, aby dostarczone dane były jak najlepszej jakości. W tym celu usunąłem powtarzające się pary (x, y) oraz usunąłem takty, które nie zawierały muzycznego kontentu.

Wybór programu dla instrumentu

Podczas etapu ekstrakcji danych z plików MIDI poza informacjami o muzyce zapamiętuję również informacje o programie partii muzycznej. Każda ścieżka MIDI przechowuje informacje o instrumencie (brzmieniu) danej partii. Istnieje 128 różnych programów, dla zmniejszenia szczególności na potrzeby modelu wyróżniam 16 instrumentów zgodnie z grupą do jakiej należą w podziale General MIDI. Dla każdej z grup sprawdzam jaki program został najczęściej wykorzystywany i zapisuję go na przyszłość. Dzięki temu przy kompilacji wygenerowanej muzyki do MIDI będzie można zdefiniować brzmienie instrumentu zgodnie z najczęściej wykorzystywanym w zbiorze uczącym.

Melodia

Dodatkowym elementem procesu ekstrakcji danych jest znalezienie ścieżek melodii przewodnich w plikach MIDI. Ścieżki tego typu zamiast być oznaczo-

ne nazwą grupy instrumentów, do której należą oznaczone są nazwą Melody. Melodia jest kategorią ścieżek z podziału ze względu na rolę partii w utworze, zamiast na instrument. Istnieją też inne role instrumentów, jednak często rola jest w pewnym sensie definiowana przez instrument. Nie jest to zasada, bardziej prawidłowość w muzyce. Uznałem, że wydobycie tej informacji na temat ścieżki nada więcej muzycznego sensu danym. Aby sprawdzić czy dana ścieżka jest melodią zastosowałem poniższą funkcję:

```
def check_if_melody(self):
    '''checks if Track object could be a melody

    it checks if percentage of single notes in
    Track.stream.notes is higher than threshold
    of 90 and there is at least 2 notes in bar per average
    '''
    events = None
    single_notes = None
    content_lenth = None

    for note in self.stream.notes:
        if self.name not in ['Bass', 'Drums']:
            events = 0
            content_lenth = 0
            single_notes = 0
            if note[0][0] != -1: # if note is not a rest
                events += 1
                content_lenth += note[1]
                if len(note[0]) == 1: # if note is a single note
                    single_notes += 1

    if events != None:
        if events == 0 or content_lenth == 0:
            return False
        else:
            single_notes_rate = single_notes/events
            density_rate = events/content_lenth
            if single_notes_rate >= 0.9 and density_rate < 2:
                self.name = 'Melody'
                return True
            else:
                return False
    else:
        return False
```

Funkcja sprawdza liczbę pojedynczych nut i akordów w ścieżce oraz zagęszczenie nut w takcie. Jeśli jest więcej niż 90% pojedynczych nut w ścieżce i jest

średnio więcej nut w takcie niż dwie, wtedy uznaję że partia instrumentalna utworu jest melodią.

3.3. Definicja modelu

Wszystkie modele sieci neuronowych zastosowane w tej pracy, zostały napisane z wykorzystaniem środowiska Keras [6]. Jest to środowisko wyższego poziomu, służące do tworzenia modeli głębokiego uczenia.

Model sequence-to-sequence jest to model składający się z dwóch mniejszych sieci neuronowych, enkodera i dekodera. Dodatkowo inaczej definiuje się model aby go uczyć, a inaczej aby dokonać predykcji.

3.3.1. Model w trybie uczenia

Definiowanie warstw enkodera

Zadaniem enkodera jest wydobyć z przetwarzanej sekwencji kontekstu skompresowanej informacji o danych. W tym celu zastosowana została jedna warstwa wejściowa o rozmiarze słownika wejściowego oraz warstwa LSTM. Definiowane warstwy są atrybutami całej klasy modelu, dlatego w prezentowanym kodzie występuje przedrostek `self..`

```
self.encoder_inputs =  
    Input(shape=(None, self.transformer.x_vocab_size))  
  
self.encoder =  
    LSTM(latent_dim, return_state=True, dropout=enc_dropout)  
  
self.encoder_outputs, self.state_h, self.state_c =  
    self.encoder(self.encoder_inputs)  
  
self.encoder_states = [self.state_h, self.state_c]
```

Ostatecznie jako dane wyjściowe otrzymujemy wektor danych ukrytych `encoder_outputs` o wymiarze równym ustalonej zmiennej `latent_dim`. Dodatkowo używając parametru `return_state=True` warstwa LSTM zwraca wektory stanu komórek h oraz c . Te wektory są pamięcią warstwy LSTM i posłużą jako stan wejściowy dla modelu dekodera.

Oba wektory zostały zapisane do jednej zmiennej `self.encoder_states`.

Definiowanie warstw dekodera

W części dekodera sieci sequence-to-sequence definiujemy warstwę wejściową o rozmiarze słownika wynikowego i jedną warstwę LSTM o stanie komórek h i c enkodera. Na końcu została zdefiniowana prosta warstwa typu `Dense` z

funkcją aktywacji `softmax`, w celu rozszerzenia wymiaru do wielkości słownika wyjściowego.

```
self.decoder_inputs =
    Input(shape=(None, self.transformer.y_vocab_size))

self.decoder_lstm =
    LSTM(latent_dim,
        return_sequences=True,
        return_state=True,
        dropout=dec_dropout)

self.decoder_outputs, _, _ =
    self.decoder_lstm(self.decoder_inputs,
        initial_state=self.encoder_states)

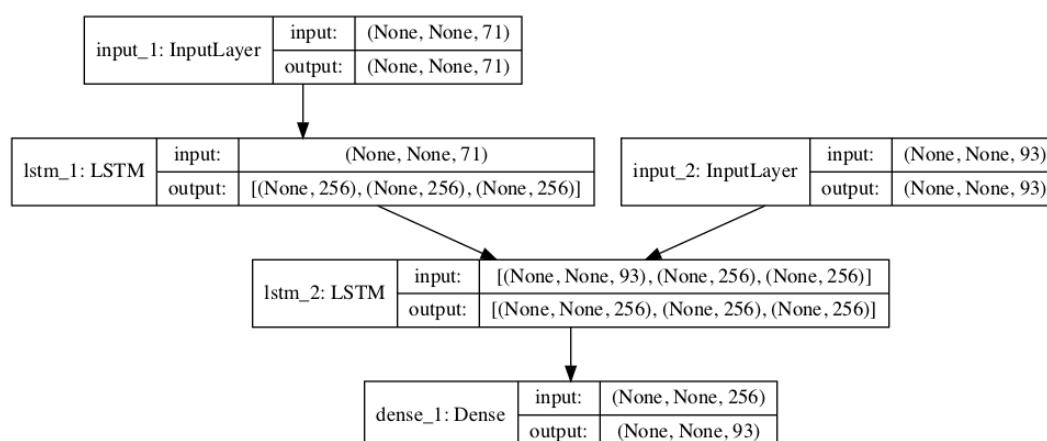
self.decoder_dense =
    Dense(self.transformer.y_vocab_size, activation='softmax')

self.decoder_outputs = self.decoder_dense(self.decoder_outputs)
```

Jako wynik propagacji modelu otrzymujemy wektor o rozmiarze słownika wyjściowego `self.transformer.y_vocab_size`, który przedstawia zakodowany element sekwencji.

Definicja modelu w trybie uczenia

Aby otrzymać model gotowy do procesu uczenia należy połączyć ze sobą enkoder i dekodery tworząc pełny model. Po jego skompilowaniu model można przedstawić jako graf tak jak pokazano to na rysunku 3.1



Rysunek 3.1. Model seq2seq w trybie uczenia¹

```
self.train_model =
    Model([self.encoder_inputs, self.decoder_inputs],
          self.decoder_outputs)
self.train_model.compile(optimizer='rmsprop',
                        loss='categorical_crossentropy')
```

Możemy zauważyć, że w procesie uczenia musimy zaprezentować modelowi dwa wektory danych wejściowych oraz jednego wektora danych wyjściowych. W pracy zostały one opisane jako:

- `encoder_input_data`, zawierające sekwencję elementów wejściowych. Te dane będą zasilać enkoder, aby na ich podstawie został wygenerowany kontekst.
- `decoder_input_data`, zawierające sekwencje elementów wyjściowych opóźnione o jeden element w czasie. Te dane będą zasilały dekoder.
- `decoder_target_data`, zawierające sekwencje elementów wyjściowych, które będą celem.

Jest to ciekawe, że musimy dostarczyć do modelu dane, które tak naprawdę chcemy otrzymać. Jednak te dane są przesunięte o jeden element w sekwencji do przodu i pierwszy element tej sekwencji nie zawiera treści. Dekoder uczy się jak na podstawie aktualnego stanu enkodera oraz aktualnego elementu sekwencji wyjściowej przewidzieć następny element w sekwencji docelowej. Warto też zauważyć, że z definicji modelu nie wynika, aby model uczył się przetwarzania całych sekwencji tylko każdego elementu sekwencji z osobna.

3.3.2. Model w trybie wnioskowania

To co czyni model `seq2seq` zdolnym do przetwarzania całych sekwencji jest sposób zdefiniowania metody wnioskowania (*ang. inference*). Na tym etapie model w sposób rekurencyjny będzie przewidywał następny element sekwencji, na podstawie tego co przewidział wcześniej oraz aktualizowanych wektorów stanu warstwy LSTM. Musimy w tym celu zdefiniować dekoder tak, aby mógł przyjąć swoje wyjście jako nowe wejście. Dlatego definicja modelu wygląda następująco, a graf przedstawiający dekoder w trybie uczenia został przedstawiony na rysunku 3.2.

```
self.decoder_state_input_h = Input(shape=(self.latent_dim,))
self.decoder_state_input_c = Input(shape=(self.latent_dim,))
self.decoder_states_inputs = [self.decoder_state_input_h,
                              self.decoder_state_input_c]
```

¹ machinelearningmastery.com/define-encoder-decoder-sequence-sequence-model-neural-machine-translation-keras 16 czerwca 2020 6:24

```

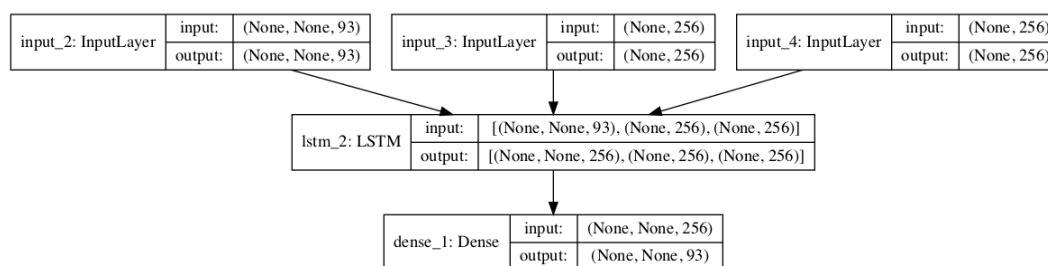
self.decoder_outputs, self.state_h, self.state_c =
    self.decoder_lstm(
        self.decoder_inputs,
        initial_state = self.decoder_states_inputs
    )

self.decoder_states = [self.state_h, self.state_c]

self.decoder_outputs = self.decoder_dense(self.decoder_outputs)

self.decoder_model = Model(
    [self.decoder_inputs] + self.decoder_states_inputs,
    [self.decoder_outputs] + self.decoder_states)

```



Rysunek 3.2. Model seq2seq w trybie wnioskowania²

Dzięki takiej definicji jesteśmy w stanie w pętli przewidywać następne elementy do momentu osiągnięcia warunku stopu. Implementacja tego procesu wygląda tak:

```

def predict(self, input_seq=None, mode=None):

    if not self.has_predict_model:
        self.init_predict_model()
        self.has_predict_model = True

    if mode == 'generate':
        h = np.random.rand(1, self.latent_dim) * 2 - 1
        c = np.random.rand(1, self.latent_dim) * 2 - 1
        states_value = [h, c]
    else:
        states_value = self.encoder_model.predict(input_seq)

    target_seq =
        np.zeros((1, 1, self.transformer.y_vocab_size))

```

² machinelearningmastery.com/define-encoder-decoder-sequence-sequence-model-neural-machine-translation-keras 16 czerwca 2020 6:24

```

target_seq[0, 0, self.transformer.y_transform_dict['<GO>']] =
    1

stop_condition = False
decoded_seq = []

y_vocab_size = self.transformer.y_vocab_size

while not stop_condition:

    output_tokens, h, c = self.decoder_model.predict(
        [target_seq] + states_value)

    sampled_token_index =
        np.argmax(output_tokens[0, -1, :])
    sampled_char =
        self.transformer.y_reverse_dict[sampled_token_index]
    decoded_seq.append(sampled_char)

    if (sampled_char == '<EOS>' or
        len(decoded_seq) > self.transformer.y_max_seq_length):
        stop_condition = True

    target_seq = np.zeros((1, 1, y_vocab_size))
    target_seq[0, 0, sampled_token_index] = 1.

    states_value = [h, c]

return decoded_seq

```

Enkoder w tym trybie ma za zadanie tylko dostarczyć do dekodera wektory kontekstu dla zainicjowania procesu. Dekoder na podstawie wektorów pamięci h i c przewidzi pierwszy element sekwencji i tym samym zainicjuje proces wnioskowania.

W tym miejscu mamy kontrolę twórczą nad dekodorem. Aby zainicjować reakcję wystarczą wektory pamięci, wtedy możemy podać dowolne wartości i zobaczyć co wygeneruje dekodek. W mojej pracy próbowałem dwóch sposobów na zainicjowanie procesu predykcji z wektorów losowych. Pierwszy polega na wygenerowaniu losowej sekwencji dla enkodera i nazywam tę metodę `from_seq`. Druga metoda polega na bezpośrednim definiowaniu stanu h i c `states_value` w sposób losowy tak, aby wartości były z przedziału $[-1, 1]$.

3.4. Transformacja danych dla modelu

Na podstawie definicji modelu wiemy, że należy przygotować trzy zestawy danych, aby móc wytrenować model. Dwa zestawy danych wejściowych i jeden

zestaw danych wyjściowych. Musimy również zakodować sekwencje elementów w taki sposób, aby można było wykonywać na nich obliczenia.

3.4.1. Enkodowanie one-hot

Każdy element sekwencji jest osobną kategorią, dlatego dane należy traktować tak jak dane katagoryczne. Wykorzystamy w tym celu enkodowanie one-hot (*ang. one-hot encoding*). Enkodowanie one-hot jest wykorzystywane w uczeniu maszynowym, aby nadać liczbową wartość danych katagorycznych. Polega ona stworzeniu słownika, w którym każde słowo otrzyma swój unikatowy identyfikator, następnie zostanie utworzony wektor o wymiarze słów w słowniku, gdzie na pozycji odpowiadającej indeksowi słowa będzie wartość 1 a na pozostałych będzie wartość 0 [3].

Przykład enkodowania one-hot

Weźmy sekwencję liter w słowie MATEMATYKA. Znajdźmy unikatowe elementy tej sekwencji oraz nadajmy im unikatowy identyfikator. Kolejność nie ma znaczenia.

M - 0, A - 1, T - 2, E - 3, Y - 4, K - 5.

Kodując słowo MATEMATYKA, otrzymalibyśmy macierz

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

3.4.2. Słownik

Aby zakodować sekwencje musimy stworzyć słownik, w którym każdy element będzie posiadał unikatowy indeks.

```
x_vocab = set([note for seq in x_train for note in seq])
y_vocab = set([note for seq in y_train for note in seq])
```

Do słownika dodajemy dwa dodatkowe elementy, które opiszę w rozdziale 3.4.3.

```
self.x_vocab = sorted(list(x_vocab))
self.y_vocab = ['<GO>', '<EOS>']
self.y_vocab.extend(sorted(list(y_vocab)))
```

Następnie tworzymy obiekty typu `dictionary`, aby zmapować elementy sekwencji na liczby oraz słowniki odwrotne, aby móc później otrzymane wyniki zamienić z powrotem na muzyczne słowa.

```
self.x_transform_dict = dict(
    [(char, i) for i, char in enumerate(self.x_vocab)])
self.y_transform_dict = dict(
    [(char, i) for i, char in enumerate(self.y_vocab)])
self.x_reverse_dict = dict(
    (i, char) for char, i in self.x_transform_dict.items())
self.y_reverse_dict = dict(
    (i, char) for char, i in self.y_transform_dict.items())
```

3.4.3. Elementy specjalne

Dodaje się dwa elementy specjalne. Te elementy mają za zadanie oznaczenie początku i końca sekwencji. Token początku sekwencji zazwyczaj oznaczany jest jako `<SOS>` (*ang. start of sequence*). Można spotkać również inne oznaczenia, np. `<GO>` lub `<s>`. Ten element ma na celu wypełnienie przestrzeni pierwszego pustego miejsca w danych wejściowych dla dekodera. Token końca sekwencji oznaczany jako `<EOS>` (*ang. start of sequence*) lub `</s>`. Ten element jest wykorzystywany, aby wywołać warunek stopu w procesie predykcji opisanym w rozdziale 3.3.2.

```
_y_train = []
for i, seq in enumerate(y_train):
    _y_train.append([])
    _y_train[i].append('<GO>')
    for note in seq:
        _y_train[i].append(note)
    _y_train[i].append('<EOS>')
```

3.4.4. Kodowanie sekwencji

Ostatecznie tworzymy tensory o rozmiarach $n \times s \times p$, gdzie n jest liczbą obserwacji `len(x_train)`, s jest maksymalną liczbą elementów w sekwencji `self.x_max_seq_length` a p jest rozmiarem słownika, czyli liczbą cech `self.x_vocab_size`.

```
self.x_max_seq_length =
    max([len(seq) for seq in x_train])
self.y_max_seq_length =
    max([len(seq) for seq in y_train])

encoder_input_data = np.zeros(
    (len(x_train),
```

```

        self.x_max_seq_length,
        self.x_vocab_size),
        dtype='float32')

decoder_input_data = np.zeros(
    (len(x_train),
     self.y_max_seq_length,
     self.y_vocab_size),
    dtype='float32')

decoder_target = np.zeros(
    (len(x_train),
     self.y_max_seq_length,
     self.y_vocab_size),
    dtype='float32')

for i, (x_train, y_train) in enumerate(zip(x_train, y_train)):
    for t, c in enumerate(x_train):
        encoder_input_data[i, t, self.x_transform_dict[c]] = 1.
    for t, c in enumerate(y_train):
        decoder_input_data[i, t, self.y_transform_dict[c]] = 1.
        if t > 0:
            decoder_target[i, t-1, self.y_transform_dict[c]] = 1.

```

W ten sposób otrzymujemy trzy zestawy danych potrzebne do przeprowadzenia procesu uczenia modelu.

Warto zwrócić uwagę, że przed opisaną transformacją sekwencje były różnej długości, a po niej rozmiar sekwencji został rozszerzony do rozmiaru najdłuższej sekwencji. Taki zabieg był niezbędny, ponieważ rozmiar sieci neuronowej jest stały dla wszystkich prób ze zbioru uczącego. Nie wpływa to jednak na samą sekwencję, ponieważ podczas predykcji kończymy w momencie wygenerowania tokenu `<EOS>`.

3.5. Ekperyment

W tej części pokażę jak wykorzystać oprogramowanie, które stworzyłem, aby wygenerować muzykę na konkretnym przykładzie. Omówię cały proces oraz przedstawię wyniki pracy.

3.5.1. Oprogramowanie

Stworzone przeze mnie oprogramowanie składa się z 2 bibliotek oraz 3 skryptów:

- `midi_processing.py` - zawiera funkcję potrzebne do pracy w plikami MIDI,
- `model.py` - zawiera definicję modelu sieci neuronowej,

- `extract.py` - służy do wydobywania z plików MIDI zbioru danych w postaci sekwencji,
- `train.py` - wykonując ten skrypt wykorzystujemy wygenerowane dane, aby wytrenować zestaw sieci neuronowych,
- `generate.py` - wykorzystuje wytrenowane modele, aby wygenerować ostatecznie plik MIDI.

Fragmenty bibliotek `midi_processing.py` i `model.py` zostały szczegółowo omówione w rozdziałach 3.2 i 3.3. Natomiast skrypty `extract.py`, `train.py` i `generate.py` zostały napisane, aby ułatwić proces generowania. Dodatkowo zapewniają powtarzalność i skalowalność prowadzonych eksperymentów.

3.5.2. Zbiór danych

W omawianym przykładzie wykorzystałem zbiór wybranych utworów MIDI zespołu The Offspring. Został on skompletowany ze źródeł dostępnych na stronie internetowej <https://www.midiworld.com/>. Składa się z 7 utworów:

- The Offspring - All I Want.mid,
- The Offspring - Change the World.mid,
- The Offspring - Nitro.mid,
- The Offspring - Original Prankster.mid,
- The Offspring - Self Esteem.mid,
- The Offspring - The Kids Arent Alright.mid,
- The Offspring - Why Dont You Get a Job.mid.

3.5.3. Wydobycie danych

Aby wydobyć dane z plików MIDI wykorzystamy skrypt `extract.py`. Można użyć flagi `-a`, aby najpierw zapoznać się z zawartością muzyczną zbioru danych.

```
>>> python extract.py offspring -a
1098 of Drums
1037 of Guitar
704 of Melody
528 of Bass
1 of Organ
```

Dzięki temu możemy zaobserwować, że w zbiorze danych jest 1098 taktów perkusji, 1037 taktów gitar, 704 melodii, 528 basu oraz 1 takt organ.

Na tym etapie musimy zdecydować, który instrument będzie generatorem oraz jakie będą zależności między partiami w zespole sieci neuronowych.

W tym przykładzie zdecydowałem, że gitara będzie generowana na podstawie losowego wektora, a melodia, bas oraz perkusja będą tworzone na podstawie partii gitary.

Uruchamiając skrypt `extract.py` bez flagi `-a` zdefiniujemy omawiany przepływ za pomocą prostego konfiguratora.

```
>>> python extract.py offspring
Please specify number of instruments
4
Please specify a workflow step
>>> Guitar m
Please specify a workflow step
>>> Melody Guitar a
Please specify a workflow step
>>> Drums Guitar a
Please specify a workflow step
>>> Bass Guitar a

Exporting: 'Guitar'
Exporting: ('Guitar', 'Melody')
Exporting: ('Guitar', 'Drums')
Exporting: ('Guitar', 'Bass')
Done.
```

Po tym etapie zostaną utworzone pliki zawierające oczyszczone pary sekwencji dla każdej sieci neuronowej. Zostały wygenerowane:

- 263 próby dla modelu gitary,
- 622 próby par melodii i gitary,
- 948 prób par perkusji i gitary,
- 385 prób par basu i gitary.

Na podstawie takiego zbioru danych w następnym kroku zostaną wytrenowane cztery sieci neuronowe, po jednej dla każdego instrumentu.

3.5.4. Trenowanie modelu

Używając skrypt `train.py` możemy w prosty sposób wytrenować wszystkie modele, a wagi zapiszą i będzie można je wykorzystać w celu generowania lub w celu dalszego uczenia.

```
>>> python train.py offspring --e 1

Using TensorFlow backend.

Training: Guitar
Train on 210 samples, validate on 53 samples
Epoch 1/1
```

```

210/210 [=====]
- 2s 10ms/step - loss: 2.1553 - val_loss: 2.0384
Training: Melody
Train on 497 samples, validate on 125 samples
Epoch 1/1
497/497 [=====]
- 6s 11ms/step - loss: 1.7045 - val_loss: 1.6693
Training: Drums
Train on 758 samples, validate on 190 samples
Epoch 1/1
758/758 [=====]
- 9s 13ms/step - loss: 2.2218 - val_loss: 2.1255
Training: Bass
Train on 308 samples, validate on 77 samples
Epoch 1/1
308/308 [=====]
- 4s 12ms/step - loss: 2.2721 - val_loss: 1.7813

```

Sieci neuronowe zostały trenowane przez 150 epok. Na potrzeby badań generowałem klipy muzyczne dla epok 1, 10, 25, 50, 75, 100, 150. Dzięki temu mogłem porównać ze sobą poszczególne etapy treningu sieci neuronowych. Wykresy funkcji kosztów dla zbioru uczącego i testowego zaprezentowane zostały na rysunku 3.3.

3.5.5. Generowanie muzyki przy pomocy wytrenowanych modeli

Gdy zdefiniowane modele zostaną wytrenowane możemy wykorzystać skrypt `generate.py`, wtedy generująca sieć neuronowa zostanie zasilona losowym wektorem, aby wygenerować partię muzyczną. W omawianym przykładzie będzie to partia gitary. Następnie ta partia posłuży jako dane wejściowe dla pozostałych modeli. Ostatecznie otrzymane sekwencje zostaną skompilowane do pliku MIDI. W tym momencie zostają wykorzystane informacje o programach dla każdego z instrumentów, a tempo utworu domyślnie ustawione jest na 120 BPM. Możemy również zdecydować, czy zasilanie dekodera modelu generującego odbędzie się za pomocą losowej sekwencji elementów ze słownika (*from_seq*), czy losowy wektor zasili bezpośrednio stany wewnętrzne dekodera *h* i *c* (*from_state*).

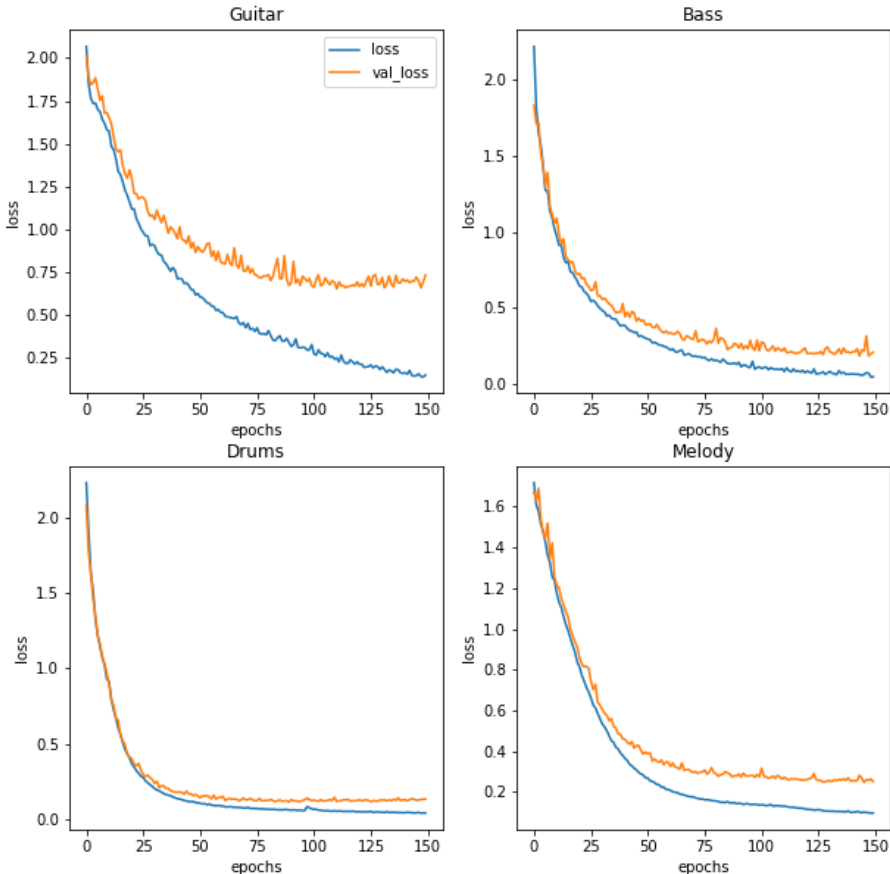
```

>>> python generate.py offspring --i 10 --m from_state

Using TensorFlow backend.
Loading models...
Generating music...
Done.

```

Parametr `--i` służy do określenia liczby wygenerowanych utworów, a parametr `--m` pozwala zdefiniować metodę generowania omówioną wyżej.



Rysunek 3.3. Wartości kosztu dla poszczególnych modeli.

Przekazywanie wygenerowanych partii to odpowiednich modeli wykonywane jest przy pomocy poniższego fragmentu kodu.

[illegible]

```
notes[instrument] = model.predict(input_data)[: -1]
```

Słownik `band` przechowuje dane dotyczące całego zespołu modeli. Zmienna `instrument` jest nazwą instrumentu, `model` przechowuje obiekt modelu sequence-to-sequence, `program` jest liczbą naturalną odpowiadającą programowi MIDI z kolekcji GM a `generator` to nazwa instrumentu na podstawie, którego powinna zostać wygenerowana kolejna partia instrumentalna.

Kompilacja do MIDI zachodzi z wykorzystaniem klas biblioteki `midi_processing.py`, które wspierają format sekwencji słów muzycznych omówionych w rozdziale 3.2.1.

```
generated_midi = MultiTrack()
for instrument, (model, program, generator) in band.items():
    if instrument == 'Drums':
        is_drums = True
    else:
        is_drums = False

    stream = Stream(first_tick=0, notes=notes[instrument])
    track = SingleTrack(name=instrument,
                        program=program,
                        is_drum=is_drums,
                        stream=stream)
    generated_midi.tracks.append(track)

generated_midi.save(save_path)
```

W ten sposób pomyślnie zostały wygenerowane fragmenty muzyczne przy pomocy głębokiego uczenia.

3.5.6. Wyniki

Przedstawię wybrane fragmenty wygenerowanych utworów w zapisie nutowym dla kolejnych etapów uczenia. Krótko scharakteryzuję każdy fragment oraz opowiem jakie ulepszenia pojawiały się wraz z postępem treningu. Wszystkie przedstawione poniżej utwory zostały wygenerowane przy pomocy metody `from_seq`.

Utwór przedstawiony na rysunku 3.4 został wygenerowany po pierwszej epoce. Model wygenerował tylko pauzy dla ścieżki gitary, dlatego nie został on umieszczony na rysunku. Wszystkie partie są bardzo powtarzalne za wyjątkiem kilku wariacji, jakby w losowych miejscach. Melodia zaczęła od dźwięku C a w trzecim takcie przeszła na dźwięk D. Linia basu jednostajnie gra dźwięk C.

Po dziesięciu epokach treningu melodia dalej wygląda na bardzo powtarzalną, jednak teraz jest bardziej spójna. Na przedstawionej na rysunku 3.5 partyturze widać, że model wygenerował partię gitary. Jednostajnie co ćwierćnutę gra akord C-G-C (tzw. Power Chord) popularnie stosowany w muzyce

epoch 1

offspring

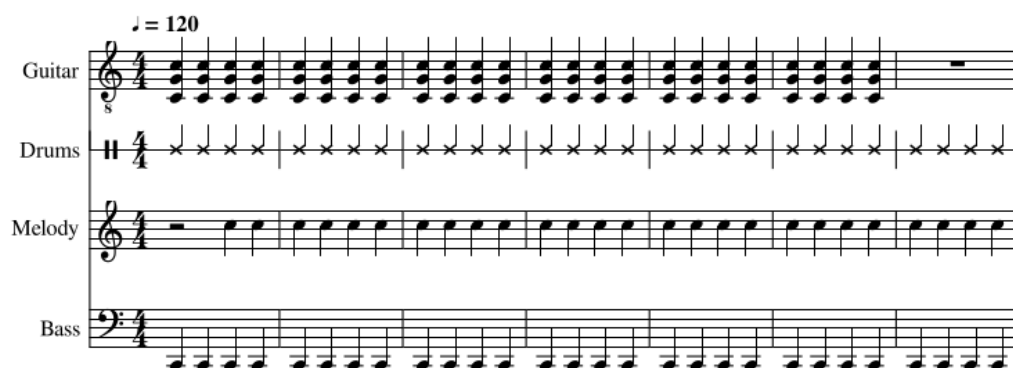


Rysunek 3.4. Wygenerowany fragment po jednej epoce.

rockowej. Perkusja wybija tylko hi-hat. Melodia gra dźwięk C, ale oktawę wyżej niż poprzednio, podobnie jak bas, tylko bas gra oktawę niżej. Cały utwór oparty jest na dźwięku C, co pomimo monotonnej i mało ciekawej aranżacji jest muzycznie poprawne i nie powoduje fałszu ani dysonansu w odbiorze.

epoch 10

offspring



Rysunek 3.5. Wygenerowany fragment po dziesięciu epokach.

Piętnaście epok później, na rysunku 3.6 model generujący gitarę nie nauczył się niczego więcej. Perkusja zaczęła generować partię przypominającą prawdziwą perkusję składającą się z wygrywanych naprzemiennie stopy i werbla. Melodia zaczęła tworzyć ciekawsze partie, wykorzystując nuty różnej długo-

ści i wysokości. Bas, który podąża za gitarą również spełnia swoją muzyczną funkcję. Cały utwór jest muzycznie poprawny.

epoch 25

offspring

The musical score for 'epoch 25' by offspring is presented in a four-staff format. The top staff is for Guitar, the second for Drums, the third for Melody, and the bottom for Bass. The time signature is 4/4, and the tempo is marked as 120. The key signature has one flat (Bb). The Guitar part is composed of a sequence of chords. The Drums part features a simple pattern of eighth notes. The Melody part consists of a series of eighth notes. The Bass part consists of a series of eighth notes.

Rysunek 3.6. Wygenerowany fragment po dwudziestu pięciu epokach.

Na rysunku 3.7 przedstawiono utwór po pięćdziesięciu epokach. W tym momencie partia gitary zaczyna wykorzystywać dwa akordy. Daje to prostą progresję akordów co mocno urozmaica utwór. Perkusja stała się bardziej jednolita, a melodia ciekawsza. Bas w dalszym ciągu monotonicznie wygrywa dźwięk C nawet w momentach, gdzie gitara gra akord Bb. Lepsze w tej sytuacji byłoby zagranie Bb również na basie.

Po siedemdziesięciu pięciu epokach uczenia, generowane utwory zaczęły być o wiele ciekawsze, ale też bardziej chaotyczne. Partia gitary stała się melodyczna. W partii perkusji widzimy talerze a bas zaczął podążać za gitarą. Pokazano opisaną sytuację na rysunku 3.8.

Na rysunku 3.9 i rysunku 3.10 przedstawiono odpowiednio wygenerowane utwory po stu i stu pięćdziesięciu epokach uczenia. Po setnej epoce możemy zobaczyć że po drugim takcie nastąpiła zmiana, gitara przeszła z melodii na akordy, natomiast najciekawsza rzecz wydarzyła się po epoce sto pięćdziesiątej. Gitara po drugim takcie zmieniła melodię na akordy i stworzyła ich progresję. Model perkusji wychwycił tę zmianę i takcie drugim zmienił sposób grania tak, aby zaakcentować przejście na akordy w trzecim takcie. Melodia po przejściu zamilkła, a bas podąża dźwiękami za melodią.

epoch 50

offspring

$\text{♩} = 120$

Guitar

Drums

Melody

Bass

Rysunek 3.7. Wygenerowany fragment po pięćdziesięciu epokach.

epoch 75

offspring

$\text{♩} = 120$

Guitar

Drums

Melody

Bass

Rysunek 3.8. Wygenerowany fragment po siedemdziesięciu pięciu epokach

epoch 100

offspring

$\text{♩} = 120$

Guitar

Drums

Melody

Bass

Rysunek 3.9. Wygenerowany fragment po stu epokach

epoch 150

offspring

$\text{♩} = 120$

Guitar

Drums

Melody

Bass

Rysunek 3.10. Wygenerowany fragment po stu pięćdziesięciu epokach

Podsumowanie

Celem pracy było zaprezentowanie modelu, który byłby w stanie generować krótkie multiinstrumentalne utwory muzyczne. Sądzę, że cel pracy został osiągnięty. Model potrafi uczyć się z plików MIDI oraz reprodukować muzykę podobną do tej, z której się uczył. Ocena jakości generowanej muzyki jest trudna i subiektywna. Uważam jednak, że przy odpowiednio dobranym zbiorze uczącym i dostosowanej konfiguracji można wygenerować ciekawe rezultaty.

Pomimo, że zaprezentowany przeze mnie model posiada potencjał nie sądzę, aby mógł on zastąpić ludzi w produkcji muzyki. Natomiast uważam, że mógłby zainspirować muzyków krótkim utworem, który następnie mógłby zostać rozbudowany przez nich do pełnego utworu.

Temat produkcji muzyki przez sztuczną inteligencję jest tematem ciekawym, jak również mocno złożonym i skomplikowanym. Istnieje wiele kwestii, które nie zostały poruszone w pracy, np. generowanie tekstu piosenki, dobranie brzmienia instrumentów czy struktury utworu, a z którymi muzycy potrafią sobie świetnie radzić. Dlatego jest jeszcze miejsce na rozwój tej dziedziny sztucznej inteligencji w przyszłości.

Bibliografia

- [1] Briot, J.P., Hadjeres, G., Pachet, F.D. (2019): *Deep Learning Techniques for Music Generation - A Survey*. *arXiv:1709.01620v3*
- [2] Brownlee, J. (2017): *How to Develop a Seq2Seq Model for Neural Machine Translation in Keras*, *machinelearningmastery.com/define-encoder-decoder-sequence-sequence-model-neural-machine-translation-keras*, 16 czerwca 2020 06:24
- [3] DeepAI (2019): *One Hot Encoding Definition*, *deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/one-hot-encoding*, 12 czerwca 2020 18:52
- [4] Géron, A. (2019): *Hands-on machine learning with scikit-learn, keras and TensorFlow*. O'Reilly.
- [5] Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016): *Deep Learning*. MIT Press.
- [6] Keras Team, (2020): *Keras API reference*, *keras.io/api*, 17 sierpnia 2019 12:34
- [7] Kostadinov, S. (2019): *Understanding Encoder-Decoder Sequence to Sequence Model*, *towardsdatascience.com/understanding-encoder-decoder-sequence-to-sequence*, 15 maja 2020 15:34
- [8] Kryszwicki, W., Włodarski, L. (1999): *Analiza matematyczna w zadaniach*, PWN.
- [9] Raffel, C. (2020): *pretty_midi*, *pypi.org/project/pretty_midi*, 15 maja 2020 9:37
- [10] Sobczyk, M. (2006): *Statystyka*. UMCS.
- [11] Swinney, A. (2020): *What is a tempo marking?*, *classicalmusiccity.com/search/article.php?vars=446/Basic-Tempo-Markings.html*, 5 kwietnia 2020 19:37
- [12] Zocca, V., Spacagna, G., Slater, D., Roelants, P. (2018): *Deep Learning. Uczenie głębokie z językiem Python*. Helion.