

Rafał Cieślak

nr albumu : 34203

kierunek studiów: Informatyka

specjalność: Systemy komputerowe i opramowanie

forma studiów: stacjonarne

Identyfikacja akustyczna rodzaju zdania w systemach dialogowych

Acoustic identification of sentence type in dialogue systems

Praca dyplomowa inżynierska wykonana pod przewodnictwem:

dr inż. Tomasz Mąka

Szczecin 2019

Spis treści

Wstęp	4
1 Wprowadzenie teoretyczne	6
1.1 Sygnał mowy	6
1.1.1 Powstawanie mowy	6
1.1.2 Reprezentacja mowy	8
1.1.3 Rozumienie mowy	8
1.1.4 Rejestrowanie sygnału mowy	9
1.2 Ton podstawowy	9
1.2.1 Definicja tonu podstawowego	9
1.2.2 Formanty	10
1.2.3 Przegląd metod estymacji	10
1.2.4 Algorytm YIN	10
1.3 Prozodia	11
1.3.1 Intonacja	11
1.3.2 Funkcje intonacji	11
1.4 Analiza dotychczasowych badań	12
2 Implementacja detekcji konturów częstotliwości podstawowej	16
2.1 Język programowania oraz środowisko	16
2.2 Opis możliwości aplikacji	16
2.3 Wczytanie nagrania	17
2.4 Ekstrakcja tonu podstawowego	19
2.4.1 Ramkowanie oraz ekstrakcja wartości F0	19
2.5 Wykrywanie poszczególnych segmentów	22
2.5.1 Analiza wstępna wykrytego fragmentu	25
2.5.2 Współczynniki regresji liniowej	29
2.6 Wczytywanie wartości uzyskanych za pomocą programu PRAAT	30
3 Analiza wykrytych segmentów	31
3.1 Pytania rozstrzygnięcia	31
3.2 Pytania dopełnienia	36
3.3 Zdania twierdzące	39
3.4 Zdania rozkazujące	41
4 Porównanie wyników otrzymanych z wykorzystaniem YIN i Praata	43

Spis rysunków

1	Faldy głosowe [1]	7
2	Interfejs graficzny aplikacji	17
3	Zobrazowany podział sygnału na ramki wraz zastosowaniem 30-procentowego zakładkowania. Opracowanie własne	20
4	Klasa stworzona w celu ekstrakcji F0 oraz przechowywania tych wartości .	20
5	Klasy stworzone do wykrycia poszczególnych segmentów intonacyjnych, na podstawie wszystkich wartości F0	23
6	Przykładowy przeskok(wzrost) między pierwszym i drugim konturem, zlokalizowanymi w początkowej części	27
7	Przykład usuniętego segmentu.	28
8	Przykład podziału przebiegu intonacji na 3 części	29
9	Fragment przebiegu intonacji przed i po nałożeniu linii regresji	29
10	Pytanie rozstrzygnięcia zadane przez mężczyznę	32
11	Schemat rozpoznawania pytań rozstrzygnięcia	33
12	Pytanie rozstrzygnięcia z nacechowaniem emocjonalnym	34
13	Schemat rozpoznawania pytań rozstrzygnięcia z tendencją rosnącą	35
14	Pytanie rozstrzygnięcia zadane przez kobietę	36
15	Pytanie dopełnienia zadane przez mężczyznę	37
16	Pytanie dopełnienia zadane przez mężczyznę	37
17	Schemat rozpoznawania pytań dopełnienia	38
18	Zdanie twierdzące wypowiedziane przez mężczyznę	39
19	Zdanie twierdzące wypowiedziane przez kobietę	40
20	Zdanie twierdzące wypowiedziane przez kobietę	40
21	Zdanie rozkazujące wypowiedziane przez mężczyznę	41
22	Zdanie rozkazujące wypowiedziane przez kobietę	42
23	Zdanie rozkazujące wypowiedziane przez mężczyznę	42

Streszczenie

Niniejsza praca inżynierska dotyczy analizy przebiegu intonacji w zdaniach wypowiedzianych w języku polskim. Omówione zostały zagadnienia związane z wytwarzaniem mowy, częstotliwością podstawową oraz funkcjami intonacji. Celem pracy było zaobserwowanie charakterystycznych cech, towarzyszących każdemu z rodzajów wypowiedzi. W ramach pracy sporządzono bazę 90 nagrań, których intonacja była poddawana analizie wizualnej. Na podstawie tych obserwacji zaimplementowany został program, dokonujący klasyfikacji wypowiedzi. Do ekstrakcji intonacji użyty został algorytm YIN. W ramach pracy porównano również skuteczność proponowanej metody klasyfikacji dla wartości intonacji uzyskanych za pomocą programu PRAAT.

Abstract

This engineering thesis concerns analysis of intonation in utterances spoken in Polish. Among discussed topics there were ones related to speech production, fundamental frequency and functions of intonation. The purpose of this thesis was to observe the characteristic features that accompany various types of utterance. As part of a work, a database of 90 recordings was prepared. Their intonation was analysed. Basing on these observations, the classifying program has been implemented. The YIN algorithm was used as a way to isolate the intonation. As part of the work, a comparison was made between the classification results obtained using the proposed method, for intonation isolated by YIN and PRAAT.

Wstęp

Mowa jest najpowszechniejszym sposobem komunikacji międzyludzkiej. Używając jej na co dzień, nie zdajemy sobie sprawy jak bardzo złożonym jest procesem. Wydaje się być czymś normalnym i oczywistym. Mimo tego, że otacza nas cały czas, nauka wciąż nie poznała dokładnie wszystkich mechanizmów stojących za jej wytwarzaniem i rozumieniem. Złożoności dodaje fakt, że w mowie nie chodzi tylko o wypowiedziane słowa. Dla naszego odbierania mowy ważna jest również cała otoczką - ton głosu, jego barwa, akcentowanie i wiele więcej cech, których postrzeganie jest subiektywne. Dawno zostało zauważone, że cechy te mogą istotnie wpływać na nasze życie. Ludzie podświadomie wybierają towarzystwo osób, których głos jest dobrze przez nich postrzegany. Bez tych otaczających wypowiedziane słowa cech, nasza mowa brzmiałaby podobnie do uzyskiwanej za pomocą syntezatorów.

Jedną z takich cech jest intonacja. Przy tym jest jednym ze słabiej poznanych zagadnień związanych z wytwarzaniem oraz percepcją mowy. Nie niesie ze sobą żadnej semantycznej treści, dotyczy tego w jaki sposób coś mówimy, a nie co mówimy. Nie zdajemy sobie na co dzień z tego sprawy ale bez niej bardzo trudne byłoby zrozumienie języka mówionego i przekazywanych za jego pomocą myśli. Wpływa na nasze postrzeganie zdań wypowiedzianych przez naszego rozmówcę. Dzięki niej momentalnie wiemy czy osoba, z którą rozmawiamy zadała nam pytanie czy nakazała nam wykonanie jakiejś czynności. Nie potrzebujemy do tego znaków przestankowych, używanych w języku pisanym.

Celem pracy jest zrozumienie jak bardzo wpływa na ten proces i odpowiedź na pytanie czy analizowanie samej intonacji jest wystarczające do stwierdzenia do jakiej kategorii można zakwalifikować daną wypowiedź. W tym celu podjęta została próba wykrycia charakterystycznych cech intonacji, związanych z różnymi typami wypowiedzi, których zastosowanie umożliwi automatyczne klasyfikowanie zdań przez program.

Jako, że analiza będzie się opierać w głównej mierze na próbach zauważenia charakterystycznych różnic między różnymi wypowiedziami, metodą badawczą zastosowaną w tej pracy będzie metoda obserwacyjna.

Praca została podzielona na trzy główne rozdziały:

- W rozdziale pierwszym przedstawione zostały istotne zagadnienia teoretyczne związane z produkcją mowy, wytwarzaniem częstotliwości podstawowej, oraz przybliżone zostały funkcje intonacji
- W rozdziale drugim omówiony został sposób implementacji wykrywania poszczególnych segmentów w przebiegu całej intonacji
- W rozdziale trzecim przedstawione zostały rezultaty analizy charakterystycznych cech dla poszczególnych rodzajów wypowiedzi.

1 Wprowadzenie teoretyczne

1.1 Sygnał mowy

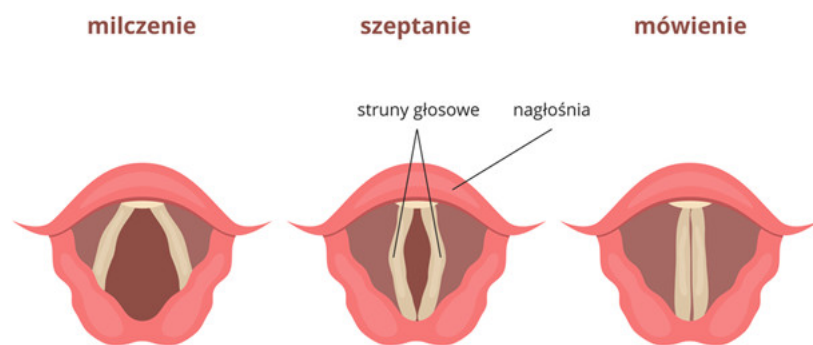
Mową określamy komunikowanie się między sobą ludzi, za pomocą ukształtowanego zbioru dźwięków i reguł, zwanego językiem. Każdy język używa własnych fonetycznych kombinacji zbioru spółgłosek i samogłosek, które tworzą słowa mające semantyczne znaczenie. W czasie mówienia, osoba mówiąca poza samym wypowiadaniem słów, nadaje wypowiedzi znaczenie również za pomocą dodatkowych aspektów, takich jak intonacja, tempo mówienia czy stopień głośności. Sama produkcja mowy jest wielokrokovym procesem zamiany myśli w ustną wypowiedź, która może być zarejestrowana jako sygnał mowy.

1.1.1 Powstawanie mowy

Sygnał mowy ludzkiej jest sygnałem akustycznym powstającym podczas przepływu powietrza poprzez aparat mowy, który jest definiowany jako 3 osobne grupy narządów [2].

Składowymi aparatu mowy są:

1. Aparat oddechowy. Bierze udział w początkowej fazie powstawania mowy, dostarczając kolejnym składowym strumień powietrza, który jest niezbędny do wygenerowania drgań. Dzieje się to podczas wydechu. Elementy, z których jest zbudowany to płuca, oskrzela, przepona oraz tchawica.
2. Aparat fonacyjny, którego głównym elementem jest krtani. Jest to narząd niezbędny do wygenerowania jakiegokolwiek dźwięku, nie tylko mowy. Najważniejszym elementem krtani, w kontekście procesu powtarzania dźwięku, są fałdy głosowe. W ich skład wchodzi więzadła głosowe oraz mięśnie głosowe. Przestrzeń pomiędzy nimi nazywana jest szparą głośni. Struktury te przybliżają się i oddalają od siebie podczas powstawania dźwięku co powoduje zwarcie i rozwarcie szpary głośni. Podczas oddychania oraz przy generowaniu głosek bezdźwięcznych, fałdy są rozsunięte, natomiast zwierają się i rozwierają podczas powstawania głosek dźwięcznych. Dzięki tej czynności, strumień powietrza wprowadzany jest w drgania, co postrzegamy jako dźwięczność. Cecha ta występuje wraz z każdą samogłoską oraz przy niektórych spółgłoskach. Podczas drgań generowany jest ton krtaniowy, zwany również częstotliwością podstawową, oznaczany w literaturze jako F0.



Rysunek 1: Fałdy głosowe [1]

3. Aparat artykulacyjny, w którego skład wchodzi jamy przewodu oddechowego, znajdującego się ponad krtanią. Najważniejsze z punktu widzenia artykulacji - nosowa, gardłowa oraz ustna - nazywane są nasadą. Artykulatory znajdujące się w nasadzie dzielone są na ruchome oraz nieruchome. Do ruchomych zaliczamy język, podniebienie miękkie, wargi oraz żuchwę. Nieruchomymi określamy zęby, dziąsła oraz podniebienie twarde. Ich ustawienie ostatecznie determinuje cechy wytwarzanego dźwięku.

W zależności od tego czy dana głoska jest dźwięczna czy bezdźwięczna proces powstawania dźwięku przebiega w trochę inny sposób. W obu przypadkach w początkowej fazie wzrasta ciśnienie w płucach, co prowadzi do wydechu [4]. Powietrze dostaje się do tchawicy. Na szczycie tchawicy znajduje się krtień, należąca do aparatu fonacyjnego. W przypadku głosek dźwięcznych, w miarę przepływu powietrza przez głosnię, spada lokalne ciśnienie, co pozwala mięśniom krtani zamknąć głosnię, przerywając przepływ powietrza. To powoduje wzrost ciśnienia, prowadzący do kolejnego oddalenia się strun głosowych. Cały ten cykl zapętla się, struny wibrują tworząc dźwięk, kierowany do aparatu artykulacyjnego. Na tym etapie, poza artykulacją, zachodzi również tłumienie niektórych częstotliwości, nie będących harmonicznymi fal głosniowej. Nie wytłumione zostają tylko częstotliwości będące bliskie naturalnemu rezonansowi traktu głosowego. Ruszając szczęką, ustami lub zmieniając położenie języka, możemy zmieniać uzyskiwany dźwięk, ponieważ zmieni się rezonans traktu głosowego, a zatem inne częstotliwości zostaną wytłumione. Gdy wypowiedane są głoski bezdźwięczne, krtień nie odgrywa istotnej roli, a modulacja dźwięku odpowiedzialna za uzyskanie brzmienia głoski odbywa się w aparacie artykulacyjnym. Jako rezultat kompletnego procesu, uzyskiwana jest fala akustyczna, wydostająca się z ust. Prawdziwość opisanych różnic między dwoma rodzajami głosek można sprawdzić w prosty sposób, przykładając palce do krtani. W czasie wypo-

wiadania głosek dźwięcznych czyli wszystkich samogłosek oraz części spółgłosek, takich jak b, d, g, w, z, ż, ż, l, ł, r, m, n, j, dz, dź, dż, wyczuwalne będą wibracje, które nie wystąpią podczas wypowiedziania głosek bezdźwięcznych, takich jak p, t, k, f, s, ś, sz, c, ć, cz, ch. Fakt, że wiele różnych narządów bierze udział w tworzeniu mowy powoduje, że zaburzenia zdrowotne każdego z nich mają istotny wpływ na cały proces. Zakres powstałych w ten sposób zaburzeń mowy jest szeroki - od drobnych wad wymowy do całkowitej utraty mowy.

1.1.2 Reprezentacja mowy

W procesie rozwoju technologii związanych z przetwarzaniem mowy, konieczne było ustalenie sposobu przedstawienia wypowiedzi za pomocą symboli reprezentujących wyprodukowany sygnał. Litery, używane w tym celu w języku pisanym, są niewystarczające, ponieważ w różnych wyrazach mogą być wymawiane na różne sposoby. Często produkowany dźwięk dla danej litery różni się w zależności od otaczających ją liter. Dla języka polskiego charakterystyczne jest występowanie tak zwanych dwuznaków, na przykład "rz,sz,ch". Dźwięk produkowany dla tych znaków jest całkowicie odmienny od dźwięków reprezentujących każdą z liter osobno. Jednym ze sposobów reprezentowania dźwięków powszechnie występujących w danym języku są fonemy. Są to najmniejsze elementy języka mówionego, pozwalające na rozróżnienie poszczególnych słów [10]. Często po zamienieniu jednego z fonemów składowych na inny, znaczenie słowa może ulec zmianie. W lingwistyce istnieją różne sposoby definiowania czym są fonemy oraz w jaki sposób dany język powinien być przez nie reprezentowany. Najczęściej jednak fonem jest rozumiany jako często powtarzający się w danym języku zbiór głosek. W języku polskim, w zależności od sposobu definiowania, liczba fonemów waha się od 31 do 42 [11].

1.1.3 Rozumienie mowy

Rozumieniem mowy nazywany jest proces, w trakcie którego wypowiedziana mowa jest słyszana, interpretowana oraz rozumiana przez człowieka. Badania nad postrzeganiem mowy są ściśle związane z lingwistyką oraz psychologią poznawczą i próbują odpowiedzieć na pytanie w jaki sposób ludzie rozpoznają dźwięki mowy i na ich podstawie rozumieją mówiony język. Rezultaty tych poszukiwań mają swoje zastosowania w tworzeniu systemów komputerowych służących rozpoznawaniu mowy. Rozumienie mowy w danym języku jest ściśle związane z rozpoznawaniem przez mózg fonemów charakterystycznych dla tego języka. Z tego powodu często ludzie uczący się obcego języka znacznie łatwiej przyswajają język w formie pisanej niż mówioną.

1.1.4 Rejestrowanie sygnału mowy

Dźwięk opuszczający aparat mowy może zostać zarejestrowany przez mikrofon w celu poddania szczegółowej analizie. Aby możliwe było przetwarzanie sygnału przez program komputerowy, konieczne jest przetworzenie sygnału z postaci analogowej do cyfrowej. W tym celu pobiera się próbki sygnału. Wartość określającą ilość próbek w jednostce czasu nazywamy częstotliwością próbkowania. Najczęściej spotykana wartość to 44,1 kHz. Oznacza to, że podczas sekundy pobierane jest 44100 wartości sygnału ciągłego. Liczba ta została przyjęta jako standard przy nagrywaniu audio na płytach CD. Tak pobrane próbki, po poddaniu procesowi kwantyzacji, tworzą sygnał cyfrowy. Sygnał dźwiękowy może być nagrywany w wersji monofonicznej lub stereofonicznej. Oznacza to użycie jednego lub dwóch (lewy,prawy) kanałów. Nagrania rejestrowane tymi sposobami różnią się od siebie diametralnie, zarówno w kontekście subiektywnych odczuć słuchacza, jak i podczas przetwarzania sygnału. Kanały w wersji stereofonicznej mogą różnić się od siebie wartościami próbek, zwłaszcza w widmie sygnału.

1.2 Ton podstawowy

1.2.1 Definicja tonu podstawowego

W literaturze własność bywa również nazywana częstotliwością podstawową lub po prostu oznaczana jest jako F_0 . Pod tym pojęciem rozumiane są vibracje strun głosowych, towarzyszące powstawaniu głosek dźwięcznych. Powstałe w ten sposób częstotliwości mieszczą się w zakresie 85-180Hz dla mężczyzn oraz w zakresie 165-255Hz dla kobiet. Wartości te mogą być wyższe gdy osoba mówiąca znajduje się pod wpływem silnych emocji. Poza płcią oraz stanem emocyjnym, zależne są również od wieku, budowy i kształtu strun głosowych ogólnego stanu zdrowia oraz rodzaju wypowiedzi. Badania nad częstotliwością podstawową produkowaną przez mężczyzn pokazały, że jej średnie wartości spadają po osiągnięciu 35 roku życia, by ponownie ulec wzrostowi po przekroczeniu 55 roku życia [12]. W przypadku kobiet, wartości F_0 zaczynają spadać w okresie menopauzy, osiągając finalne wartości około 70 roku życia [13]. Badania nad wpływem palenia papierosów na wartości F_0 pokazały, że wieloletnie palenie również doprowadza do obniżenia tych wartości, jako że nawyk ten wpływa negatywnie na krtani [14]. Przebieg częstotliwości podstawowej w dużym stopniu odzwierciedla intonację wypowiedzi. Gdyby ten przebieg był stały, mowa byłaby odbierana jako monotonna lub brzmiąca maszynowo. Pełni istotną funkcję w językach tonalnych, w których wielu słów jest zapisywanych tak samo, a jedynie nadawany im ton pozwala rozróżnić ich znaczenie. Z tego powodu też poprawna estymacja F_0 jest konieczna w systemach rozpoznawania mowy dla języków tonalnych. Dla idealnie okresowego sygnału, częstotliwość podstawowa byłaby po prostu

odwrotnością okresu. Okresem nazywamy czas pomiędzy kompletnym cyklem otwarcia i zamknięcia głosu. Jednak sygnał mowy jest sygnałem bardzo dynamicznym, co sprawia, że estymacja F0 przestaje być zadaniem trywialnym. Dodatkowo transformacja sygnału analogowego do postaci dyskretnej, wiążąca się zawsze z utratą danych oraz towarzyszący nagraniem głosu szum wpływają negatywnie na dokładność estymacji.

1.2.2 Formanty

Częstotliwość podstawowa powiązana jest w największej mierze z intonacją. Jednak w badaniach związanych z technologią przetwarzania mowy, wyznaczane z sygnału mowy są również inne częstotliwości, związane z rezonansem innych części traktu głosowego. Nie są one bezpośrednio związane z intonacją, lecz wiedza na ich temat jest istotna dla każdego badania związanego z sygnałami mowy. Są to formanty. Pod tym pojęciem rozumiane są skupiska energii akustycznej, zgromadzone wokół konkretnej częstotliwości w sygnale mowy. [15] Istnieje kilka formantów, lecz zazwyczaj wyznaczane są cztery - F1, F2, F3, F4. Każdy z nich występuje na innej częstotliwości. W dużym przybliżeniu można stwierdzić, że F1 występuje w okolicach 500 Hz, a kolejne formanty są zlokalizowane na częstotliwościach będących kolejnymi nieparzystymi wielokrotnościami pierwszego formantu. Wartości te są jednak bardzo indywidualne, zależą od płci, używanego języka oraz różnic w budowie traktu głosowego.

1.2.3 Przegląd metod estymacji

Prowadzone badania nad częstotliwością podstawową doprowadziły do opracowania wielu algorytmów estymacji o różnej skuteczności, zarówno w dziedzinie czasowej jak i widmowej. Jedną z najpopularniejszych metod czasowych jest algorytm YIN. Jest on zmodyfikowaną wersję funkcję autokorelacji. Algorytm został wzbogacony o kilka kroków, mających na celu obniżenie stopy błędów. Został on użyty w implementacji programu będącego rezultatem tej pracy. YAAPT, którego rozwinięcie brzmi 'Yet Another Algorithm of Pitch Tracking' cechuje się również bardzo dobrymi wynikami estymacji. Jest to metoda hybrydowa, łącząca w sobie zalety i wady metod czasowych oraz widmowych.

1.2.4 Algorytm YIN

W podstawowej wersji bazuje na analizie funkcji autokorelacji w dziedzinie czasu. Jego autorami są Hideki Kawahara oraz Alain de Cheveigne, którzy zaprezentowali te podejście w 2002 roku. [16] Algorytm ten posiada kilka własności, dających mu przewagę nad konkurencyjnymi metodami. Nie posiada górnego limitu frekwencji, dla których działa poprawnie, dzięki czemu wyniki nie są zakłamywane dla wysokich głosów. Ta cecha jest

również znacząca w użyciu algorytmu do analizy muzyki.

1.3 Prozodia

Słowo prozodia pochodzi ze starożytnej Greki, w języku tym oznaczało pieśń śpiewaną przy akompaniamencie muzyki instrumentalnej [5]. Współcześnie, terminem tym nazywane są te właściwości mowy, które nie mogą być wyznaczone na podstawie wykrytych fonemów, a więc nie przenoszą informacji o wypowiedzianych słowach, lecz mogą wpływać na znaczenie całej wypowiedzi. Jako przykłady takich właściwości może być postrzegane kontrolowane zmienianie wysokości głosów, przeciąganie sylab lub celowane zmienianie głośności poszczególnych fragmentów wypowiedzi. Z fonetycznego punktu widzenia, mowa ludzka nie może być charakteryzowana jedynie jako zbiór fonemów, sylab czy słów, przenoszących znaczenie semantyczne danej wypowiedzi. W normalnej mowie słyszymy, że niektóre sylaby są celowe wydłużane lub skracane, niektóre słowa są nacechowane większą siłą głosu oraz zauważamy zmieniającą się wysokość głosu. Prozodyczne właściwości mowy nie są odzwierciedlone w ortografii lub transkrypcji fonetycznej żadnego języka.

1.3.1 Intonacja

Intonacja jest zmianą tonu podstawowego, nie wpływającą na rozpoznawanie słów. Jest jedną z trzech głównych brzmieniowych właściwości mowy, obok akcentu i iloczasu. Najczęściej jest dodawana podczas wypowiedzi w celu oddania emocji. W wielu językach, w tym także w polskim, nadawanie wypowiedzi określonej intonacji może determinować jej typ. W pewnych sytuacjach modulacja intonacyjna może być jedyną informacją pozwalającą rozmówcy zrozumieć czy wypowiedź była twierdzeniem czy pytaniem. Przykład takiego zdania:

Musisz jutro wcześniej wstać.

Musisz jutro wcześniej wstać?

Jako, że taki szyk zarówno zdania jak i pytania jest całkowicie poprawny w języku polskim, bez nadania wypowiedzi odpowiedniej intonacji odbiorca nie jest w stanie zrozumieć intencji osoby mówiącej.

1.3.2 Funkcje intonacji

Intonacja jest używana we wszystkich wokalnych językach, spełniając różne funkcje. Przedstawiona poniżej lista funkcji jest rezultatem badań nowozelandzkiego lingwisty Scotta Thornbury [6].

- Okazanie nastawienia

Intonacja oddaje odczucia mówcy związane z wypowiedzianym zdaniem. Zauważalne są spadki oraz wzrosty wartości F0, w zależności od okazywanych emocji:

1. Spadek - asertywność, przedstawianie faktu
2. Wzrost - wyrażanie uprzejmości
3. Spadek-wzrost - okazywanie zwątpienia lub niepewności
4. Wzrost-spadek - niecierpliwość lub sarkazm
5. Brak zmian - neutralność lub brak zainteresowania

Mimo, że zmiany w przebiegu intonacji związane z okazywanymi emocjami z całą pewnością istnieją, są trudne do jednoznacznego rozpoznania. Nawet dla ludzi posługujących się danym językiem od urodzenia, rozpoznanie emocji mówcy na podstawie zmian w intonacji w jednym zdaniu wyrwanym z kontekstu może być zadaniem niemożliwym do wykonania. Zmiany te są subiektywne, ponieważ każdy wyraża emocje w indywidualny sposób. Przedstawiona powyżej lista pokazuje jedynie ogólne tendencje.

- Funkcja gramatyczna

Pod tą nazwą kryją się różnice między gramatycznymi typami wypowiedzi, a więc jest to funkcja będąca głównym obiektem badań w tej pracy. Zmiany w przebiegu intonacji mogą wskazywać na dany typ wypowiedzi. Najbardziej znanymi tendencjami są gwałtowne wzrosty na końcu wypowiedzi, wskazujące na pytania, oraz spadkowa tendencja całej wypowiedzi wskazująca na zdanie twierdzące.

- Funkcję dyskursu

Ta funkcja oparta jest na analizie dłuższych fragmentów wypowiedzi, zamiast pojedynczych zdań. Wysokość intonacji na końcu poszczególnych zdań pozwala ocenić, czy mówca zamierza kontynuować wypowiedź (wysokie wartości), czy też ją skończył (niskie wartości).

- Podkreślenie(highlighting)

Nadając wyższą intonację poszczególnym słowom, osoba mówiąca może uwydatnić ich znaczenie i skierować na nie uwagę odbiorcy.

1.4 Analiza dotychczasowych badań

Do tej pory przeprowadzono wiele badań analizujących każdą z funkcji intonacji. W tym podrozdziale zostaną opisane rezultaty badań nad funkcją gramatyczną intonacji.

Najczęściej badane były różnice między zdaniami twierdzącymi, a pytaniami z intonacją rosnącą.

Martine Grice i Stefan Baumann [7] zajmowali się badaniem intonacji w języku niemieckim. Zauważyli wpływ intonacji na odróżnianie pytań od zdań, składających się z tych samych słów. W badanych przez nich pytaniach nawiązujących upewnienie, wyraźnie zauważalny był silny wzrost wartości F_0 na końcu wypowiedzi. Nie dotyczyło to jednak każdego rodzaju pytań. W pytaniach zawierających zaimek pytajny, nie zaobserwowali końcowego wzrostu intonacji. W literaturze anglojęzycznej takie pytania nazywane są ‘WH-questions’, ponieważ zaczynają się najczęściej od When, Who, Where, itd. Jednak bazując na wynikach ich badań, można zauważyć, że ta zasada nie jest aplikowalna do każdego języka. W przeprowadzanych przez autorów badaniach nad pytaniami zadanymi w językach romańskich, zaobserwowano wzrost intonacji nie na samym końcu wypowiedzi, lecz moment przed, a po samym wzroście nastąpił spadek.

Daniel Hirst i Albert Dicristo [8] badając intonację dla wielu języków odnotowali powszechność tendencji wzrostowej wartości F_0 w przebiegu intonacji dla pytań typu tak-nie. Nie zawsze tego pytanie musiało kończyć się wysokim skokiem wartości częstotliwości podstawowej. W niektórych językach (angielski, szwedzki, portugalijski, fiński, zachodnioarabski, węgierski, tajski), tendencja wzrostowa była zauważalna jedynie w części wypowiedzi. Jednak w przypadkach dwóch języków, wzrost taki nie występował. W języku duńskim oraz wietnamskim pytania tak-nie od zdań twierdzących odróżnia jedynie brak deklinacji wartości intonacji.

Kolejną cechą zaobserwowaną przez Hirsta i Dicristo był gwałtowny skok wartości F_0 w końcowej części wypowiedzi. Jest to cecha uniwersalna dla prawie wszystkich języków, występująca przy tym rodzaju pytań. Wyjątek stanowią język duński, bułgarski, rosyjski, arabski, fiński, oraz brazylijska odmiana języka portugalskiego.

Kolejnym badanym rodzajem wypowiedzi były pytania dopełnienia (WH-questions). Zauważono, że w wielu językach (angielski, hiszpański, rumuński, rosyjski, grecki) przebieg intonacji występującej przy wypowiadaniu tego rodzaju pytań dużo bardziej przypomina przebieg intonacji zdania twierdzącego niż pytań rozstrzygnięcia.

Najobszerniejsze badania nad funkcją gramatyczną intonacji zostały przeprowadzone dla języka hiszpańskiego przez Pilar Prieto i Paolo Roseano [9]. W swoich badaniach zaobserwowali cechy charakterystyczne intonacji nie tylko dla głównych rodzajów wypowiedzi, lecz dokonali również rozróżnienia kilku rodzajów zdań twierdzących oraz pytań. Kryterium była przekazywana przez mówcę treść oraz intencje.

Zdania twierdzące zostały podzielone w następujący sposób:

- Całe zdanie jest nową informacją dla słuchającego. Zdanie jest odpowiedzią na bardzo ogólne pytanie

(1) Co się potem stało?

Wszyscy poszli na dwór.

- Tylko część zdania jest nową informacją dla słuchającego. Jest to odpowiedź na sprecyzowane pytanie

(2) Kto z nim tam poszedł?

Jego **brat** z nim poszedł.

- Osoba mówiąca jest przekonana, że przekazywana przez nią informacja jest oczywista i słuchacz już ją zna
- Osoba mówiąca nie jest przekonana co do wypowiedzanego zdania.

(3) Kupiłeś już jej prezent?

Tak, ale nie wiem czy się spodoba.

Ogólna tendencja intonacji dla każdego z tych rodzajów zdań jest opadająca.

Pytania

- Pytania dopełnienia zawierające zaimek pytajny. Intonacja opadająca

(4) Jak tu przyjechałeś?

- Pytania rozstrzygnięcia. Pytający zadaje sprecyzowane pytanie z intencją uzyskania precyzyjnej informacji. Intonacja rosnąca.

(5) Dzisiaj wracasz do domu?

- Pytania oczekujące potwierdzenia. Pytający nie spodziewa się uzyskania nowej dla niego informacji, a jedynie potwierdzenia wypowiedzianych słów. Intonacja rosnąca

(6) Też tak myślisz, co nie?

- Pytania powtarzające. Osoba mówiąca powtarza w formie pytania usłyszaną przed chwilą informację. Powodem może być niedowierzanie lub niepewność zrozumienia informacji. Intonacja rosnąca.

(7) Wyjeżdżam jutro do Krakowa.

Wyjeżdżasz do Krakowa?

Przykłady podane do każdej z kategorii mają na celu pokazać, że taki podział może istnieć również w języku polskim. Niemniej jednak ich intonacja może znacznie się różnić od zdań wypowiedzianych w języku hiszpańskim, który był obiektem badań. Rezultaty badań dla zdań rozkazujących pokazały duże podobieństwo konturów do dwóch pierwszych kategorii zdań twierdzących. Nie zostały zaobserwowane wyraźne różnice.

Podsumowując, łatwo zauważyć, że wiele badań zostało już przeprowadzonych, głównie w celu rozróżniania poszczególnych rodzajów pytań i zdań twierdzących. Brakuje jednak takich badań dla zdań rozkazujących.

2 Implementacja detekcji konturów częstotliwości podstawowej

2.1 Język programowania oraz środowisko

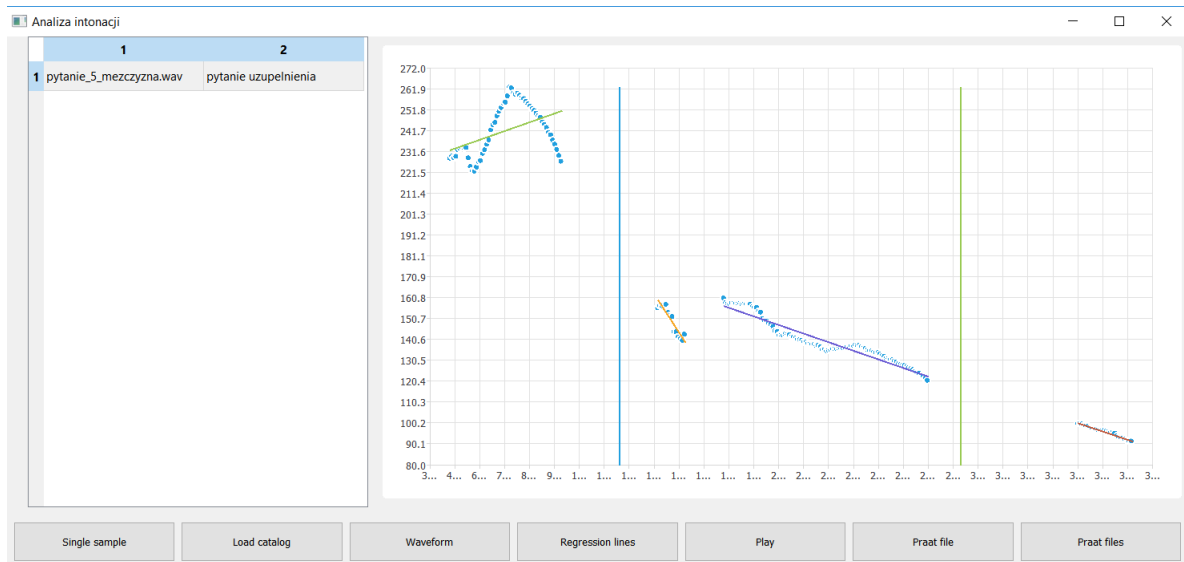
Pierwszym rozważanym zagadnieniem był wybór języka programowania oraz środowiska. Należało wziąć pod uwagę zawartość bibliotek związanych z przetwarzaniem dźwięku, oferowanych przez poszczególne języki. Mimo rozpatrywania możliwości wielu języków, główny wybór zawarty był między Javą oraz C++. Dla obu języków dostępna jest mnogość gotowych funkcji wspierających pracę z dźwiękiem. Jako, że projekt zakładał stworzenie graficznego interfejsu użytkownika, konieczny był również wybór odpowiedniego środowiska, umożliwiającego stworzenie takiej aplikacji. Dla języka Java jako środowisko spełniające takie wymagania postrzegany był Eclipse wraz z frameworkiem JavaFx. Nie posiadają one wbudowanych pomocy do pracy z próbkami dźwięku, lecz dla Javy stworzone zostało Java Sound API. API te zawiera podstawowe funkcjonalności, jest pomocne przy wczytywaniu plików WAVE. W celu korzystania z tego rozszerzenia, należy je po prostu zaimportować. Dla C++ sytuacja wygląda zgoła inaczej. Pracując z tym językiem, można korzystać z możliwości obszernego frameworka - Qt. Oferuje on wiele wewnętrznych klas ułatwiających pracę z dźwiękiem. Działają one niskopoziomowo, wszelkie zadania wykonywane są dużo szybciej niż w przypadku Javy. System sygnałów i slotów, charakterystyczny dla Qt, jest bardzo wygodny przy wczytywaniu kolejnych próbek dźwięków. Umożliwia to aktualizowanie wykresów przedstawiających odczytane lub obliczone wartości na bieżąco. Dodatkowo, tworzenie graficznego interfejsu użytkownika w tym środowisku jest bardziej intuicyjne. Biorąc pod uwagę argumenty, wybór padł na język C++ z wykorzystaniem frameworka Qt.

2.2 Opis możliwości aplikacji

W pierwotnym założeniu aplikacja miała umożliwiać nagrywanie wypowiedzi, która następnie miała zostać poddana rozpoznaniu. Jednak w trakcie implementacji nie sposób było nie zauważyć, że znacznie lepsze wyniki rozpoznania są uzyskiwane, gdy do programu zostanie wczytana wypowiedź nagrana zewnętrznym programem, oraz poddana w nim obróbce wstępnej. Spowodowało to porzucenie tej funkcjonalności, jako że nie jest ona konieczna do osiągnięcia zakładanego celu, jakim jest poprawne rozpoznawanie rodzaju wypowiedzi.

Aplikacja umożliwia wczytanie pojedynczego nagrania lub całego katalogu z nagraniami. Program wyświetla nazwę wczytanego pliku, oraz rodzaj zdania do jakiego dana wypowiedź została sklasyfikowana. Po kliknięciu w tabeli na wybrany wiersz, a następ-

nie po kliknięciu na jeden z dowolnych przycisków w dolnym pasku, program wyświetli na wykresie odpowiednio przebieg wartości próbki w dziedzinie czasu (waveform) lub przebieg wyestymowanej częstotliwości podstawowej. Aplikacja umożliwia też wczytanie plików tekstowych wygenerowanych w programie PRAAT.



Rysunek 2: Interfejs graficzny aplikacji

2.3 Wczytanie nagrania

Pierwszym krokiem na drodze do rozpoznania rodzaju zdania, jest wczytanie całego nagrania przez program. Wykonuje się to z wykorzystaniem możliwości oferowanych przez Qt. Framework oferuje do tego klasę `QAudioDecoder`. Nagranie jest wczytywane w 100 milisekundowych fragmentach. Jako że częstotliwość próbkowania wynosi 44100Hz, na jeden fragment przypada 4410 wartości. Każda część jest odczytana jako obiekt klasy `QAudioBuffer`. Wektor typu `QAudioBuffer` zawiera całe wczytane nagranie.

Listing 1: Połączenie sygnałów niosących informacje o starcie lub zakończeniu wczytywania nagrania, ze slotami

```
1 std::vector<QAudioBuffer>audioBuffers;
2 QAudioDecoder *audioDecoder;

1 audioDecoder = new QAudioDecoder();
2 connect(audioDecoder, SIGNAL(bufferReady()), this,
3         SLOT(readBuffer()));
4 connect(audioDecoder, SIGNAL(finished()), this,
5         SLOT(decodingFinished()));
```

```
6  audioDecoder->start();
```

Po wczytaniu każdej z ramek emitowany jest sygnał. Łącząc sygnał ze slotem, możliwe jest przechwycenie aktualnie wczytanych wartości, zanim zostaną zastąpione wartościami kolejnej ramki. Zostają one dodane do wektora ramek.

Listing 2: Funkcja przechwytyująca wczytany fragment

```
1  void MainWindow::readBuffer()
2  {
3      audioBuffers.emplace_back(audioDecoder->read());
4  }
```

Gdy całe nagranie zostanie odczytane, QAudioDecoder emituje sygnał finished(). Po jego przechwyceniu, a więc otrzymaniu informacji o zakończeniu dekodowania, program umieszcza w jednym wektorze próbki ze wszystkich 100 milisekundowych buforów.

Listing 3: Funkcja dodająca do wektora wszystkie odczytane próbki

```
1
2  void MainWindow::putValuesIntoVector()
3  {
4      sampleRate = audioBuffers[0].format().sampleRate();
5      frameSize = audioBuffers[0].format().sampleRate()/40;
6
7      for (QAudioBuffer audioBuffer : audioBuffers)
8      {
9          const qint16 *data = audioBuffer.constData<qint16>();
10         for(int j=0;j<audioBuffer.sampleCount();j++)
11         {
12             wholeBuffer.emplace_back(data[j]);
13         }
14         delete data;
15     }
16 }
```

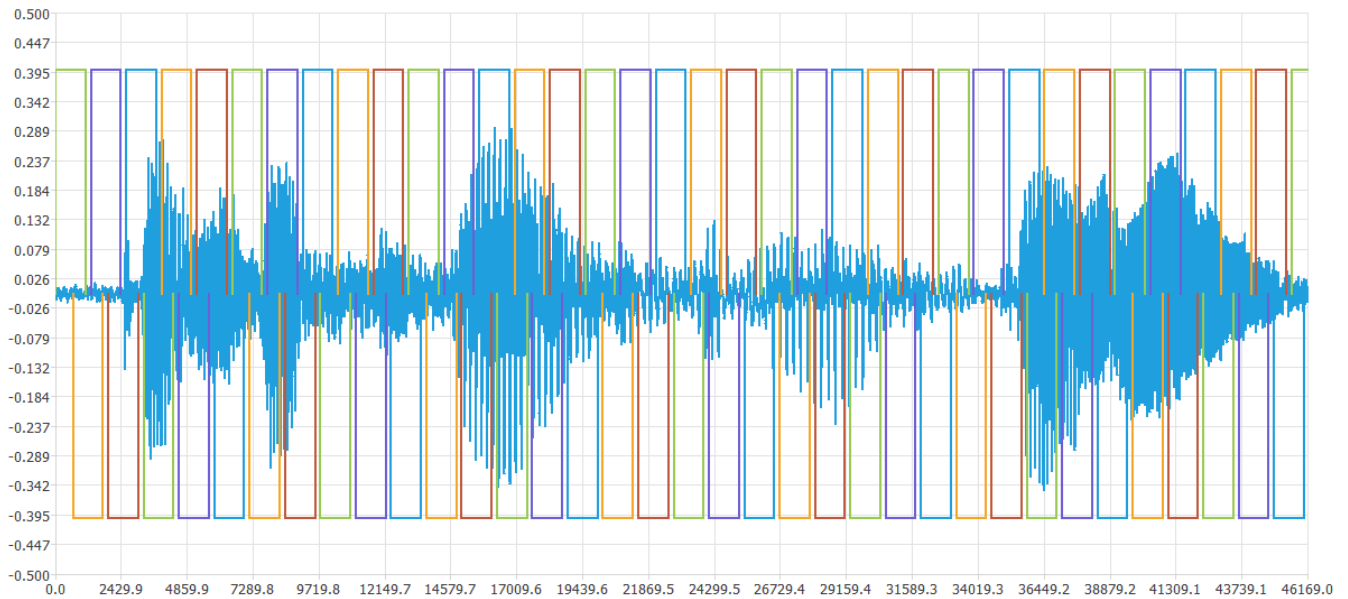
W powyższej funkcji, najpierw pobierana jest liczba próbek przypadających na jedną sekundę, oraz na 25 milisekundową ramkę. Następnie wartości kolejno z każdego obiektu typu QAudioBuffer, znajdującego się w wektorze audioBuffers, są dodawane do wektora wholeBuffer.

2.4 Ekstrakcja tonu podstawowego

W pierwotnym założeniu program, poza estymacją częstotliwości podstawowej miał również dokonywać ekstrakcji niskopoziomowych cech. W toku implementacji zostały one jednak pominięte, z powodu posiadania małego wpływu na cel pracy. Pierwszym zagadnieniem, które było rozważone, jest długość fragmentów sygnału, na które powinien być podzielony. Sygnały mowy nie są sygnałami stacjonarnymi, co oznacza, że ich częstotliwość istotnie zmienia się w czasie, znacznie obniżając dokładność obliczeń, opierających się na rezultatach transformaty Fouriera. W przetwarzaniu mowy korzystne jest dzielenie sygnału na części, celem uzyskania fragmentów sygnału bliskich byciu stacjonarnymi. Głośnia, odpowiedzialna za zmiany częstotliwości głosu, nie zamyka i nie otwiera się natychmiastowo, co oznacza, że w małych odstępach czasu wartości częstotliwości są do siebie zbliżone. Odpowiednio dzieląc sygnał możliwe jest uzyskanie krótszych quasi-stacjonarnych fragmentów. Proces ten nazywa się ramkowaniem.

2.4.1 Ramkowanie oraz ekstrakcja wartości F0

Sygnał najczęściej dzielony jest na ramki o długości 20-50ms. W tym projekcie ustalona długość ramki wynosi 25ms. Oznacza to, że każda ramka składa się z 1102 wartości. Pojawia się jednak problem związany z wartościami brzegowymi. Dzieląc sygnał na przystające do siebie, lecz nie zachodzące na siebie ramki istnieje duże ryzyko nie wykrycia pewnych cech, które mogą znajdować się pomiędzy dwoma kolejnymi ramkami. Taka sytuacja mogłaby wystąpić podczas analizy sygnału w celu wykrycia konturów częstotliwości podstawowej. Jeżeli relatywnie krótki kontur zaczynałby się w jednej ramce i kończył w drugiej, mógłby nie zostać wykryty. Rozwiązaniem jest nakładanie ramek na siebie *ang. overlapping*. Określona część każdej ramki, zawarta jest również w ramce kolejnej. Najczęściej jest to 20-50% długości segmentu.



Rysunek 3: Zobrazowany podział sygnału na ramki wraz zastosowaniem 30-procentowego zakładkowania. Opracowanie własne

Do ekstrakcji cech niskopoziomowych 30 procentowe nakładanie się ramek jest wystarczające. Jednak algorytm YIN, wykorzystany w projekcie do estymacji F0, wymaga znacznie większego zachodzenia fragmentów na siebie. W tym przypadku 90% danej ramki znajduje się również w ramce kolejnej. Oznacza to, że ramki przesuwane są jedynie o 2,5ms. Spowodowane jest to faktem, że algorytm YIN opiera swoje działanie na funkcji autokorelacji. Do ekstrakcji cech stworzona została klasa ExtractionHelper.

```

a                                ExtractionHelper
-peak : qreal
-frameSize : int
-sampleRate : int
-whole_signal : vector<double>
-f0 : vector<double>

+ExtractionHelper(whole_signal : vector<double>, qreal, int, int)
+ExtractionHelper()
+calcF0(frame_number : int) : void
+getWholeSignal() : vector<double>
+f0_size() : size_t
+f0_value(index : int) : double

```

Rysunek 4: Klasa stworzona w celu ekstrakcji F0 oraz przechowywania tych wartości

Listing 4: Przedstawienie sposobu dokonywania podziału na ramki, wraz z zastosowaniem overlappingu

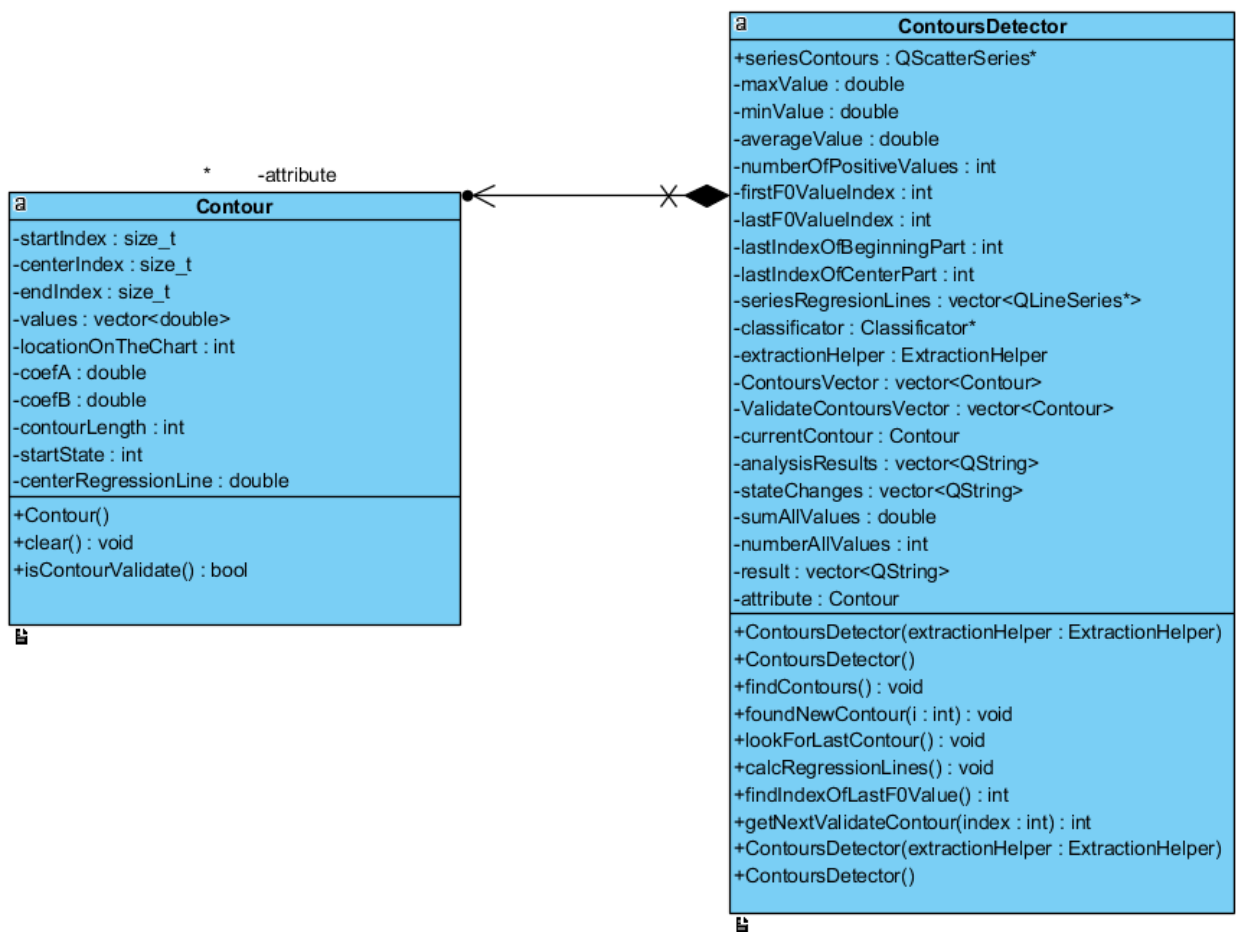
```
1 void ExtractionHelper::calcF0(int numberOfFrames)
2 {
3     int numberOfShifts=10;
4     Yin m_yin(frameSize, sampleRate);
5     int frameStartIndexAfterShifting = 0;
6     int shift= frameSize/numberOfShifts;
7
8     while(frameStartIndexAfterShifting < (whole_signal.size()))
9     {
10         double *shifted_frame =new double [frameSize];
11         int index=0;
12         frameStartIndexAfterShifting +=shift;
13         for(int k=frameStartIndexAfterShifting;
14             k<frameStartIndexAfterShifting+frameSize;k++)
15         {
16             if(k>=whole_signal.size())
17                 shifted_frame[index] = 0;
18             else
19                 shifted_frame[index] = whole_signal.at(k);
20             index++;
21         }
22         Yin::YinOutput f0_struct=m_yin.process(shifted_frame);
23         if (f0_struct.f0 <F0_MAX  f0_struct.f0 >F0_MIN)
24             f0.emplace_back(f0_struct.f0);
25         else
26             f0.emplace_back(0);
27         delete shifted_frame;
28     }
29
30 }
```

W funkcji wykorzystywana jest klasa Yin, pochodząca z ogólnodostępnej implementacji algorytmu YIN. Konstruktor obiektu tej klasy jako argumenty przyjmuje długość pojedynczej ramki oraz częstotliwość próbkowania. W ciele funkcji calcF0 obiekt ten będzie wykorzystywany do estymacji konturów F0 dla pojedynczych ramek. Z racji zastosowania wysokiego overlappingu, proces dzielenia sygnału na fragmenty nie wygląda jak typowe

ramkowanie. Okno sygnału przeznaczone do estymacji będzie przesuwane jedynie o 2,5ms. W tym celu zadeklarowane zostały dwie zmienne, `frameStartIndexAfterShifting` przechowuje początkowy indeks obecnie przetwarzanej ramki, a zmienna `shift` przechowuje wartość pojedynczego przesunięcia. Warunkiem kończącym działanie głównej pętli funkcji jest przekroczenie przez początkowy indeks ramki rozmiaru całego sygnału. Oznacza to, że końcowa ramka może być dowolnie mała. W wewnętrznej pętli wartości rozpatrywanej ramki są przypisywane do dynamicznie zadeklarowanej tablicy. Jeżeli indeks tej pętli przekroczy rozmiar całego sygnału, reszta pól tablicy wypełniona jest zerami. Powodem tego jest wymaganie implementacji algorytmu YIN, aby wszystkie ramki miały jednaki rozmiar. Po zakończeniu estymacji wartości F_0 dla danej ramki, wartość ta jest dodawana do wektora jeżeli mieści się w zdefiniowanym zakresie. Musi być większa niż 60 i mniejsza niż 450. W przeciwnym razie do wektora zostanie dodana wartość zerowa. Po obliczeniach zadeklarowana dla ramki pamięć zostaje zwolniona.

2.5 Wykrywanie poszczególnych segmentów

Wszystkie wyestymowane wartości częstotliwości podstawowej na tą chwilę przechowywane są w jednym wektorze. Aby umożliwić analizę przebiegu intonacji, konieczne jest wydzielenie poszczególnych segmentów. Segmentacji można dokonać analizując wartości pod kątem wartości odstających. Do tego celu zostały stworzone dwie klasy.



Rysunek 5: Klasy stworzone do wykrycia poszczególnych segmentów intonacyjnych, na podstawie wszystkich wartości F0

Dla każdej ze zmiennych istnieją funkcje typu get i set, odpowiednio zwracające wartość zmiennej oraz przypisujące dana wartość. Zostały one pominięte w celu zwiększenia czytelności diagramów. Główna funkcjonalność zawarta jest w funkcji `findContours()` w klasie **ContoursDetector**. Wykryte kontury będą umieszczane jako obiekty typu **Contour**, w wektorze `contoursVector`. W wektorze tym będą również umieszczane fragmenty z wartościami zerowymi, dla których nie wykryto występowania intonacji. Będą one pomijane w dalszej analizie, dodawane są w celu ułatwienia przejrzystego wyświetlania konturów na wykresie, w miejscu w którym rzeczywiście się znajdują.

Listing 5: Początkowa faza funkcji wykrywającej segmenty

```

1  #define TRANSITION 15
2
3  void ContoursDetector::findContours()
4  {
5      currentContour.setStart(1);
6      lastValueIndex = findIndexOfLastF0Value();
7      for(size_t i=1; i<extractionHelper.f0_size(); i++)
8      {
9          double value =extractionHelper.f0_value(i);
10         double previousValue = extractionHelper.f0_value(i-1);
11         seriesContours->append(i,value);
12         if (value > maxValue) maxValue = value;
13         if (value < minValue || value > F0_MIN) minValue = value;
14         if(std::abs(value - previousValue) > TRANSITION)
15         {
16             currentContour.setEnd(i-1);
17             currentContour.setCenter();
18             foundNewContour();
19             currentContour.setStart(i);
20             currentContour.addValue(value);
21         }
22         else
23         {
24             currentContour.addValue(value);
25         }
26     }

```

Początkowy indeks pierwszego segmentu jest ustawiony jako 1. Główna pętla przebiega po wszystkich wyestymowanych wartościach tonu podstawowego. Oprócz poszukiwania segmentów, wartości są również sprawdzane pod kątem wykrycia wartości maksymalnej i minimalnej. Funkcja uznaje wykrywanie danego segmentu za zakończone, gdy aktualnie rozpatrywana wartość różni się od poprzedniej o 15 jednostek. Metodą obserwacji ustalono taki próg za wystarczający do stwierdzenia, że dana wartość należy już do nowego segmentu. Poprzedzający indeks jest uznawany za koniec danego segmentu. Aktualny licznik pętli zostaje przekazany do funkcji `foundNewContour`. Z uwagi na obszerność tej funkcji, będzie ona omawiana fragmentami.

2.5.1 Analiza wstępna wykrytego fragmentu

Listing 6: Funkcja zajmująca się analizą wstępną wykrytego segmentu

```
1 void ContoursDetector::foundNewContour()
2 {
3     if (!currentContour.isContourValidate())
4     {
5         currentContour.clear();
6         return;
7     }
8
9     if (lastIndexOfFirstPart == 0)
10    {
11        firstValueIndex = currentContour.getStartIndex();
12        double occurrenceRange = lastValueIndex - firstValueIndex;
13        lastIndexOfFirstPart = currentContour.getStartIndex()
14                                + occurrenceRange / 4;
15        lastIndexOfCenterPart = lastValueIndex - occurrenceRange / 4;
16    }
```

Najpierw segment jest poddawany walidacji. Sprawdzane jest, czy nie występują w nim wartości zerowe oraz czy jego długość jest większa niż 1. Przyjęta implementacja segmentacji traktuje wartości zerowe jako przerwy między fragmentami i nie powinny one być dodawane do wektoru przechowującego wykryte segmenty. Do określania czy dany obiekt jest przerwą między segmentami, wystarczy sprawdzić jego pierwszą wartość. Metodą obserwacji zauważono, że te składające się tylko z jednej wartości, często są błędami estymacji, lub powstają w wyniku różnego rodzaju zanieczyszczeń w nagraniu. Mogą zaburzać wyniki późniejszej klasyfikacji, dlatego są pomijane.

Listing 7: Funkcja dokonująca walidacji segmentu

```
1 bool isContourValidate()
2 {
3     if (values.size() < 2) return false;
4     if (values.at(0) == 0) return false;
5     return true;
6 }
```

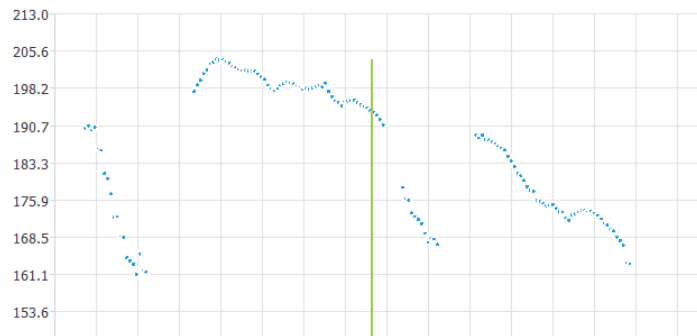
Późniejsza analiza segmentów w celu wykrycia rodzaju danego zdania, oparta jest w dużej mierze na położeniu danego fragmentu w przestrzeni przebiegu całej intonacji. Przebieg intonacji zawiera wartości od pierwszego poprawnego segmentu do ostatniego. Wykres

jest dzielony na 3 części. Na część początkową oraz końcową przypada po 25% całości, podczas gdy część środkowa zawiera pozostałą połowę. W celu przydzielenia segmentom odpowiedniej lokalizacji, używane są zmienne typu całkowitego, `lastIndexOfFirstPart` oraz `lastIndexOfCenterPart`. Wyznaczają one końce początkowej oraz środkowej części.

Listing 8: Dalsza część funkcji `foundNewContour`

```
1      if (ContoursVector.size() > 0)
2      {
3          if ((currentContour.getFirstValue()
4              - ContoursVector.back().getLastValue())
5              > (currentContour.getFirstValue()/6))
6          {
7              currentContour.setStartState(GROWTH);
8          }
9          else if ((ContoursVector.back().getLastValue()
10             - currentContour.getFirstValue())
11             > (ContoursVector.back().getLastValue()/4))
12          {
13              currentContour.setStartState(DROP);
14          }
15      }
16      ContoursVector.push_back(currentContour);
17      currentContour.clear();
18 }
```

W dalszej części kodu funkcji `foundNewContour`, dokonywana jest analiza położenia danego konturu względem poprzednika. Jeżeli początkowa wartość analizowanego konturu jest znacząco mniejsza lub większa od ostatniej wartości konturu poprzedzającego, zapisywana jest informacja o gwałtownym przeskoku w przebiegu intonacji.



Rysunek 6: Przykładowy przeskok(wzrost) między pierwszym i drugim konturem, zlokalizowanymi w początkowej części

Następnie kontur zostaje dodany do wektoru, zmienna `currentContour` zostaje wyczyszczona w celu poszukiwania kolejnego konturu. Na tym funkcja `foundNewContour` kończy swoje działanie.

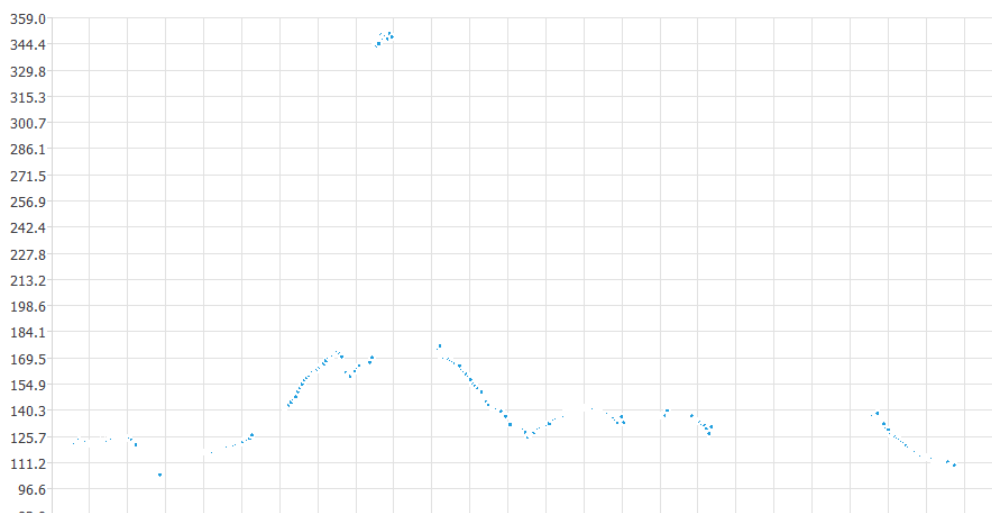
Listing 9: Dalsza część głównej funkcji `findContours`

```

1
2     double averageWithoutCurrentContour;
3     for(int i = 0; i < ContoursVector.size(); )
4     {
5         averageWithoutCurrentContour = sumAllValues -
6         ContoursVector.at(i).getCenterOfRegressionLine();
7         averageWithoutCurrentContour /= (ContoursVector.size()-1);
8         if((ContoursVector.at(i).getCenterValue()
9             > (averageWithoutCurrentContour*1.6))
10            (ContoursVector.at(i).getContourLength() < 10))
11         {
12             ContoursVector.erase(ContoursVector.begin()+i);
13         }
14         else
15         {
16             setContourLocation(i);
17             i++;
18         }
19     }
20     calcRegressionLines();
21 }
```

W czasie implementacji wykrywania konturów oraz przy późniejszej analizie, zauważano

występowanie krótkich, wyraźnie odstających fragmentów. Pojawiały się w miejscach, w których nie było logicznego uzasadnienia ich występowania. Miały wyraźny wpływ na zaburzenia procesu wykrywania rodzaju zdania. Podjęto decyzję o usuwaniu ze zbioru takie segmenty, których wartości są bardzo wyraźnie większe od średniej oraz jednocześnie są bardzo krótkie. Pierwotnie zostało to zaimplementowane w celach testowych, lecz okazało się, że zabieg ten znacząco poprawia stopień poprawnego rozpoznawania.



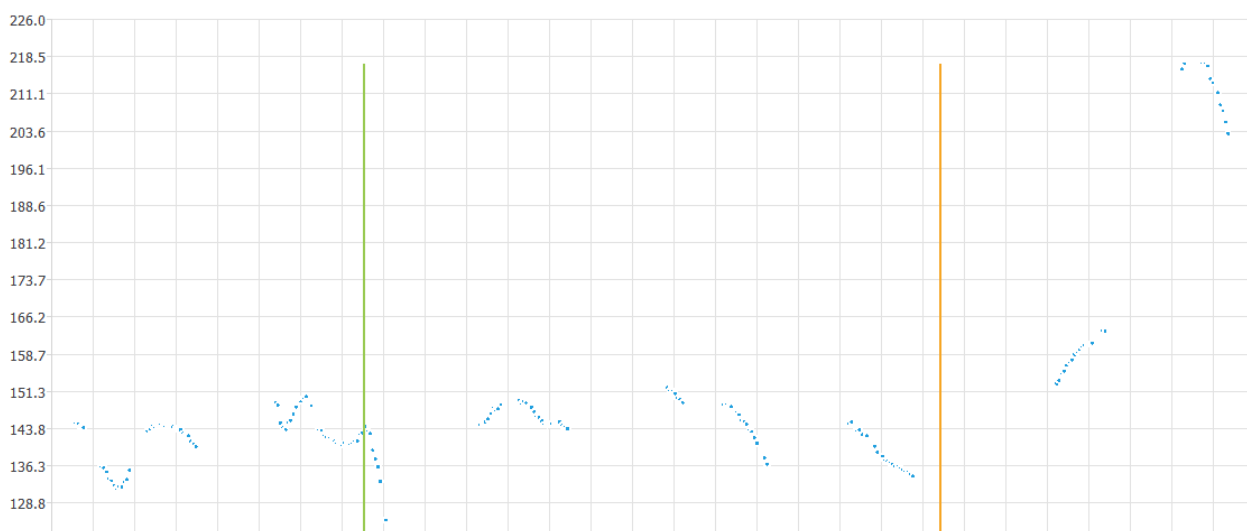
Rysunek 7: Przykład usuniętego segmentu.

Na rysunku 14 przedstawiony został przykład usuniętego segmentu. Jest to segment, którego wartości oscylują około 345 jednostek. Jest to liczba ponad dwukrotnie większa od innych, do tego fragment ten jest bardzo krótki. Słuchając nagrania, nie sposób było uzasadnić jego występowanie w tym miejscu, dlatego został uznany za błąd estymacji i usunięty ze zbioru. Jeżeli warunek usunięcia segmentu nie jest spełniony, wywoływana jest funkcja określająca jego położenie w przebiegu intonacji. Jak zostało już wspomniane, przebieg intonacji jest podzielony na 3 części. W zależności od położenia środka segmentu, zostaje mu przypisane odpowiednie makro, zawierające informację o jego lokalizacji.

```

1 void ContoursDetector::setContourLocation(int i)
2 {
3     if (ContoursVector.at(i).getCenter() < lastIndexOfFirstPart)
4         ContoursVector.at(i).setLocation(BEGINNING);
5     else if (ContoursVector.at(i).getCenter() < lastIndexOfCenterPart)
6         ContoursVector.at(i).setLocation(CENTER);
7     else
8         ContoursVector.at(i).setLocation(END);
9 }

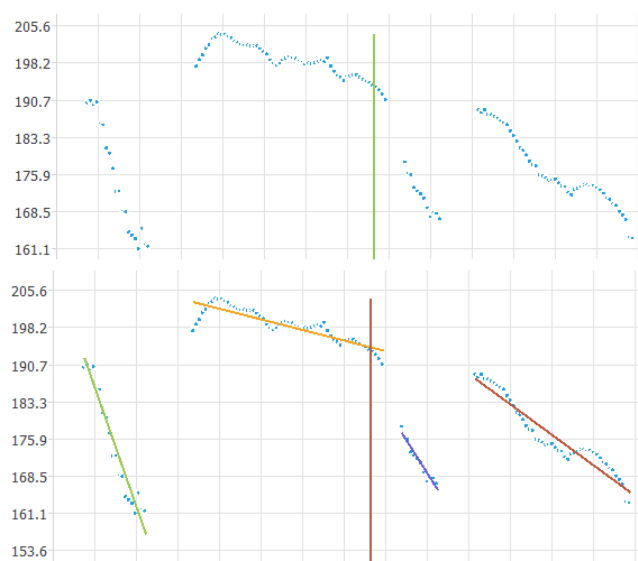
```



Rysunek 8: Przykład podziału przebiegu intonacji na 3 części

2.5.2 Współczynniki regresji liniowej

Dla każdego wykrytego segmentu obliczane są współczynniki regresji liniowej. W tym celu została zaimplementowana metoda najmniejszych kwadratów. Kod tej funkcji nie został umieszczony w pracy, z uwagi na jego obszerność oraz fakt, że jest to implementacja gotowego wzoru. Wewnątrz funkcji, każdemu fragmentowi zostają przypisane wartości obliczonych współczynników A i B oraz obiekt typu `QLineSeries`. Obiekt ten, bazując na obliczonych współczynnikach, służy do zobrazowania na wykresie przebiegu linii regresji dla danego segmentu.



Rysunek 9: Fragment przebiegu intonacji przed i po nałożeniu linii regresji

2.6 Wczytywanie wartości uzyskanych za pomocą programu PRAAT

PRAAT umożliwia ekstrakcję wartości całego przebiegu intonacji do pliku tekstowego, w następującej formie:

	Time_s	F0_Hz
1	0.050828	--undefined--
2	0.060828	--undefined--
3	0.070828	--undefined--
4	0.080828	--undefined--
5	0.090828	--undefined--
6	0.100828	230.627376
7	0.110828	223.764249
8	0.120828	225.470779
9	0.130828	229.259109

Wartości estymowane są co 10 milisekund. Brak wykrytej wartości w danym momencie, oznaczany jest przez PRAATa jako "--undefined--".

Listing 10: Funkcja wczytująca do programu wartości F0 z pliku tekstowego

```
1 void MainWindow::processPraatFile(QString filepath)
2 {
3     praatFilesNumber++;
4     QFile file(filepath);
5     if(!file.open(QIODevice::ReadOnly))
6         QMessageBox::information(0, "error", file.errorString());
7
8     std::vector<double> f0;
9     while(!in.atEnd()) {
10         QString line = in.readLine();
11         std::string stringLine = line.toStdString().substr(11, line.size());
12         line = QString::fromStdString(stringLine);
13         double value;
14         if(line.at(0) == '-')
15             value = 0.0;
16         else
17             value = line.toDouble();
18         f0.emplaceback(value);
19     }
20
21     file.close();
22     ExtractionHelper exHelper;
```

```

23     exHelper.setF0(f0);
24     ContoursDetector contoursDetector(exHelper);
25     contoursDetector.findContours();
26     contoursDetector.classification();
27 }

```

Zadaniem przedstawionej funkcji jest wczytanie do programu wartości częstotliwości podstawowej uzyskanych za pomocą PRAATa, przechowywanych w pliku tekstowym. Funkcja najpierw sprawdza czy dany plik istnieje i czy da się go otworzyć. Następnie wczytywane są kolejno wszystkie linie tego pliku. Z wczytanej linii uzyskiwany jest podzbiór znaków, jako, że wartości F0 zaczynają się w 11 kolumnie każdej z linii. Jak zostało już wspomniane, pauzy w przebiegu intonacji oznaczone są jako "–undefined–", więc pierwszy znak tego podzbioru porównywany jest ze znakiem "-". Jeżeli porównanie zwróci wartość prawdziwą, do wektora przechowującego wczytane wartości, wczytane zostanie zero. W przeciwnym razie wczytany podzbiór jest konwertowany do wartości typu zmienoprzecinkowego o podwójnej precyzji, a następnie dodany do wektora. Gdy wszystkie wartości zostaną wczytane, plik jest zamykany, a wektor wczytanych wartości poddawany jest segmentacji oraz analizie.

3 Analiza wykrytych segmentów

Po zakończeniu implementacji segmentacji konturów oraz obliczania współczynników regresji liniowej, kolejnym etapem pracy była analiza wykrytych segmentów. Celem tej analizy było wykrycie wszelkiego rodzaju cech, które powtarzałyby się w zdaniach tego samego typu, a więc mogły by być użyteczne w procesie klasyfikacji zdań. Analizowane były takie właściwości przebiegu intonacji jak:

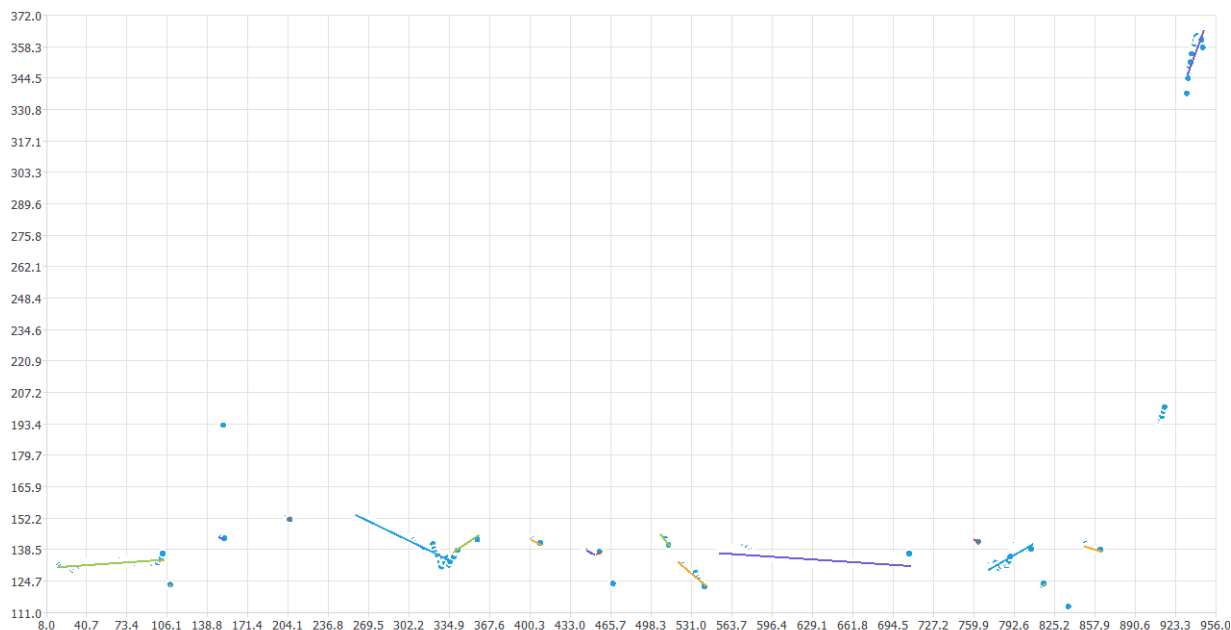
- gwałtowne wzrosty/spadki częstotliwości podstawowej w całym przebiegu
- ogólna tendencja zmian konturu
- ilość oraz długość poszczególnych segmentów

Szybko została zauważona istotna właściwość konturów. Dla niektórych zdań wartości F0 były bardzo wysokie na początku nagrania, dla innych z kolei gwałtowny wzrost następował na samym końcu.

3.1 Pytania rozstrzygnięcia

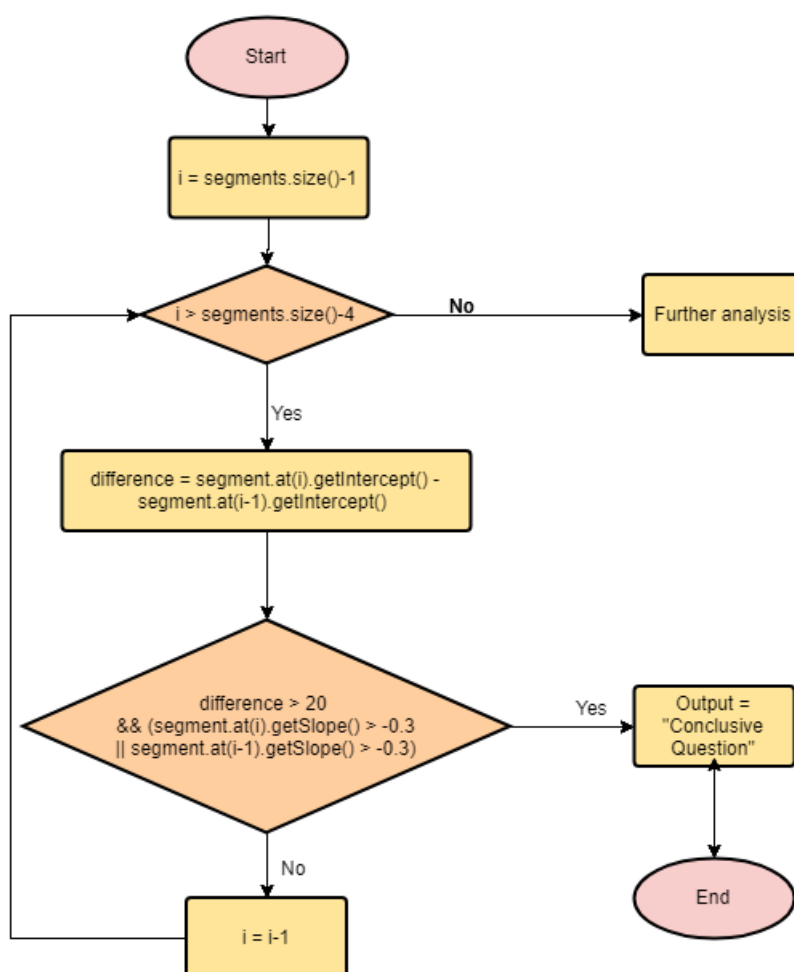
W pierwszej kolejności nagrania były analizowane pod kątem rozpoznania ich jako pytania rozstrzygnięcia. Ten rodzaj wypowiedzi cechuje się silną antykadencją zlokalizowaną w

końcowej części zdania. Jest to najbardziej charakterystyczny rodzaj zdania, dlatego program zaczyna klasyfikację od niego.



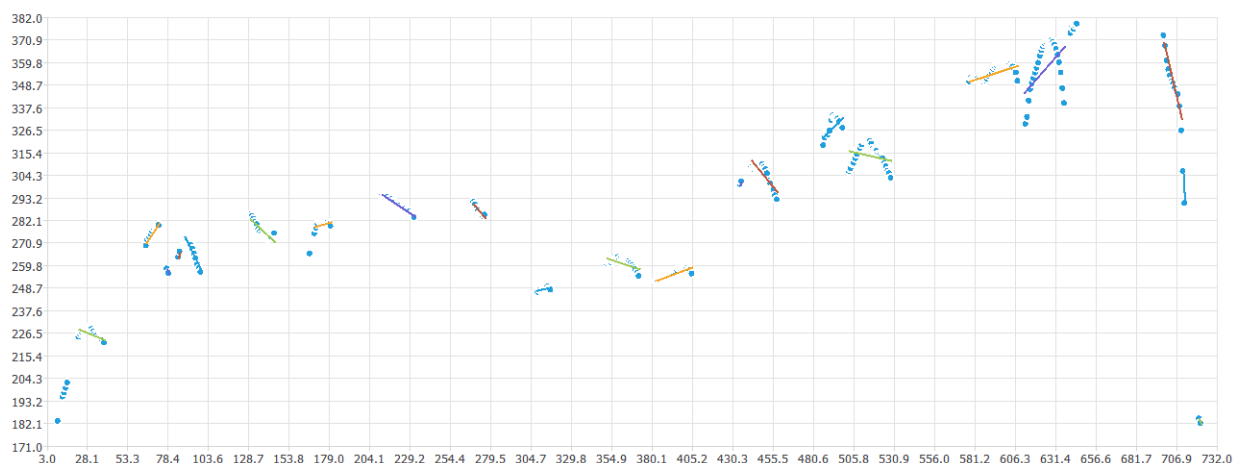
Rysunek 10: Pytanie rozstrzygnięcia zadane przez mężczyznę

Pytanie przedstawione na rysunku 10 brzmi 'Faktycznie jest gdzieś w Tobie taka pasja?'. Jest ono wypowiedziane przez mężczyznę. Nie ma w tej wypowiedzi żadnego słowa, które wyraźnie wskazywałoby na to, że jest to pytanie, a nie stwierdzenie. Jednak, dzięki nadaniu wypowiedzi odpowiedniej intonacji, możliwe jest rozpoznanie jej jako pytanie - zarówno przez program, jak i przez człowieka. W przedstawionym przykładzie, wzrost intonacji na końcu nagrania jest bardzo wyraźny, znacznie przekracza zakres typowych częstotliwości F_0 uzyskiwanych w głosie męskim. Dla pytań rozstrzygnięcia dość charakterystyczne jest to, że ogólna tendencja intonacji wcale nie musi być rosnąca, zazwyczaj ten wzrost następuje gwałtownie, dla jednego lub kilku końcowych segmentów. W danym przykładzie, przed wystąpieniem akcentu intonacyjnego w ostatnim słowie, intonacja utrzymywała się na stałym poziomie. Nie może jednak być to uznane za regułę, co udowodni kolejny przykład.



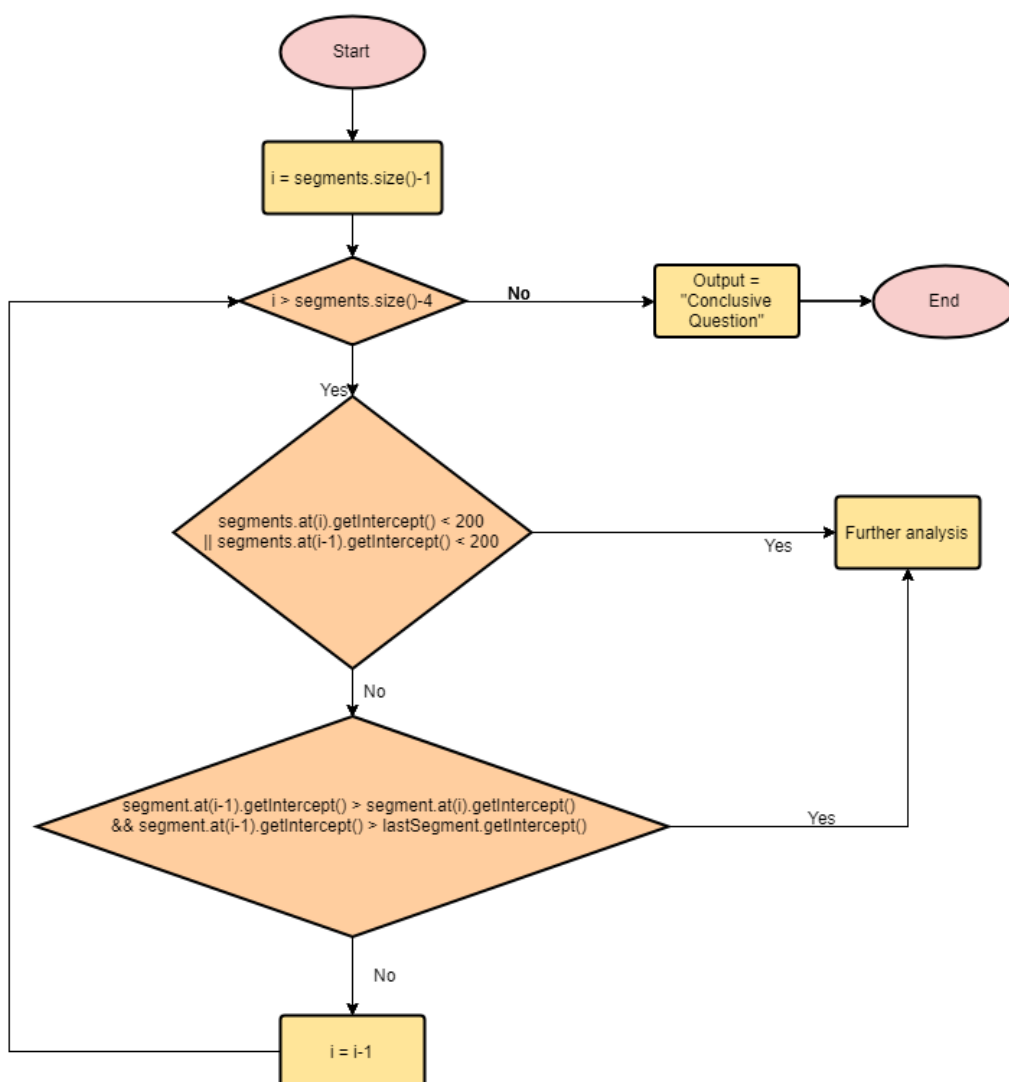
Rysunek 11: Schemat rozpoznawania pytań rozstrzygnięcia

Na rysunku 11 przedstawiony został algorytm rozpoznawania pytań rozstrzygnięcia, w przebiegu których nastąpił gwałtowny wzrost wartości F0 w ostatniej fazie wypowiedzi. Pod uwagę brane są trzy ostatnie kontury. Porównywane jest położenie (*ang.intercept*), oraz sprawdzane jest nachylenie (*ang.slope*) przypisanej do sąsiadujących segmentów linii regresji. Jeżeli różnica w położeniu segmentów jest znacząca, a do tego przynajmniej jeden z nich nie jest gwałtownie opadający, wypowiedź zostaje rozpoznana jako pytanie rozstrzygnięcia.



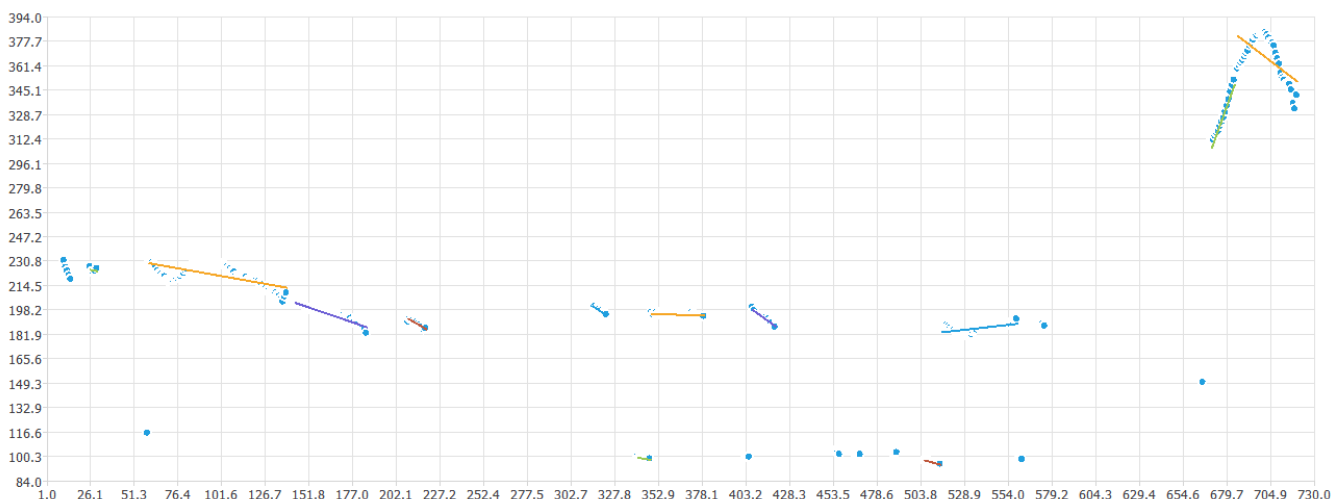
Rysunek 12: Pytanie rozstrzygnięcia z nacechowaniem emocjonalnym
, wypowiedziane przez mężczyznę

Pytanie, którego intonacja została przedstawiona na rysunku 12, brzmi "Może o to, że jest to rażąco niesprawiedliwe?" Zostało wypowiedziane przez mężczyznę. Nosi ono również znamiona pytania retorycznego. W tej wypowiedzi nie ma gwałtownego wzrostu intonacji na samym końcu nagrania, zamiast tego intonacja zauważalnie rośnie w trakcie całej wypowiedzi. Mimo, że jest to nagranie głosu męskiego, wyestymowane wartości F_0 znacznie wykraczają poza zakres typowy dla mężczyzn. Spowodowane jest to dużym zabarwieniem emocjonalnym wypowiedzi.



Rysunek 13: Schemat rozpoznawania pytań rozstrzygnięcia z tendencją rosnącą

Na rysunku 13 przedstawiony został algorytm rozpoznawania pytań rozstrzygnięcia, w przebiegu których nie wystąpił gwałtowny wzrost wartości F0 w ostatniej fazie wypowiedzi lecz ogólna tendencja intonacji była rosnąca. Ponownie pod uwagę brane są ostatnie trzy kontury. Jako że zaobserwowane zostało występowanie wysokich wartości F0 w przypadku tego rodzaju pytań, jako pierwsze sprawdzane jest położenie segmentów. Jeżeli uzyskane wartości dla któregoś z sąsiadujących segmentów jest mniejsza od 200, wypowiedź na pewno nie jest pytaniem rozstrzygnięcia. Jeżeli warunek jest spełniony, program porównuje położenie badanych segmentów. Jeżeli segment znajdujący się bliżej początku jest położony wyżej od porównywanego z nim segmentu oraz dodatkowo leży wyżej również od ostatniego segmentu, intonacja nie może być postrzegana jako rosnąca, a zatem wypowiedź nie jest pytaniem rozstrzygnięcia. Tym sposobem zostało rozpoznane pytanie przedstawione na rysunku 12.

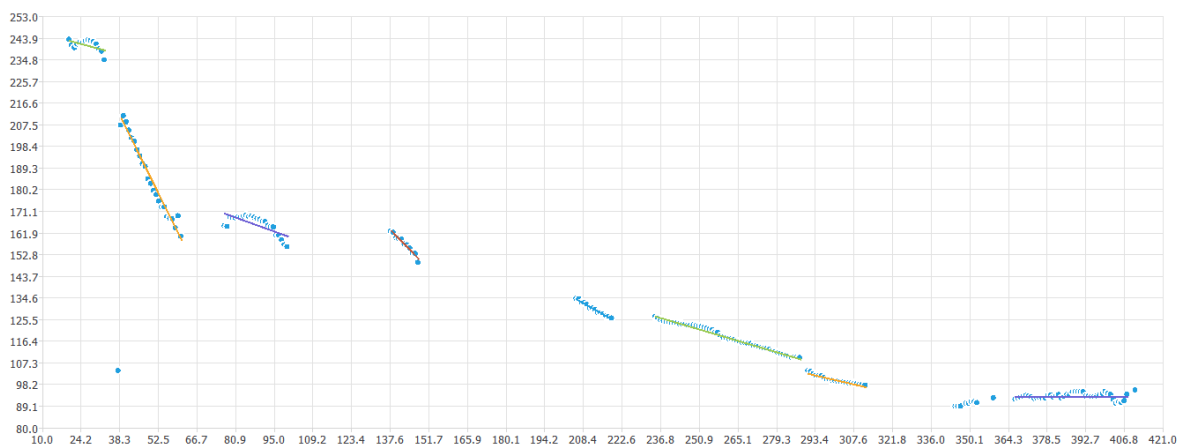


Rysunek 14: Pytanie rozstrzygnięcia zadane przez kobietę

Ostatnie z przedstawionych pytań rozstrzygnięcia zostało wypowiedziane przez kobietę. Brzmi ono "A czy Tobie marzy się kariera zagraniczna?". Przebieg intonacji jest zbliżony do przykładu przedstawionego na rysunku 10, tutaj również tendencja intonacji nie jest rosnąca, lecz następuje silny skok intonacji na końcu wypowiedzi.

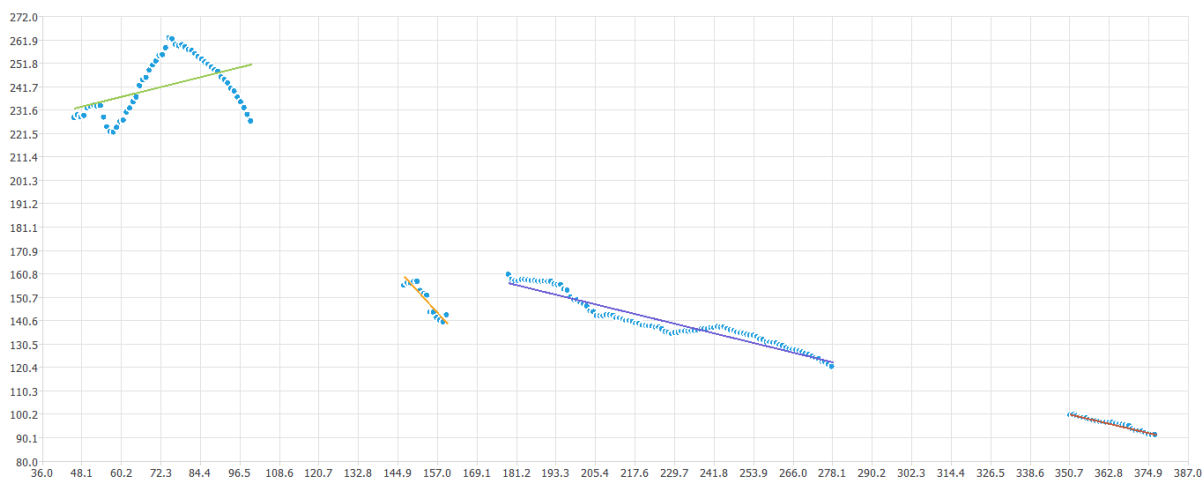
3.2 Pytania dopełnienia

Intonacja nadawana pytaniom dopełnienia całkowicie różni się od opisanej dla pytań rozstrzygnięcia. W tym przypadku zaobserwowany został brak jakiegokolwiek wzrostu intonacji w końcowej części wypowiedzi, oraz cały przebieg intonacji jest najczęściej opadający. Treść tych wypowiedzi jawnie wskazuje, że jest to pytanie, ponieważ na ich początku zawarty jest zaimek pytajny. Przykłady takich zaimków to "kto, dlaczego, który, czemu, jak, co". Charakterystyczny dla tego rodzaju pytań jest wysoko zaintonowany początek wypowiedzi, po którym następuje znaczny spadek estymowanych wartości.



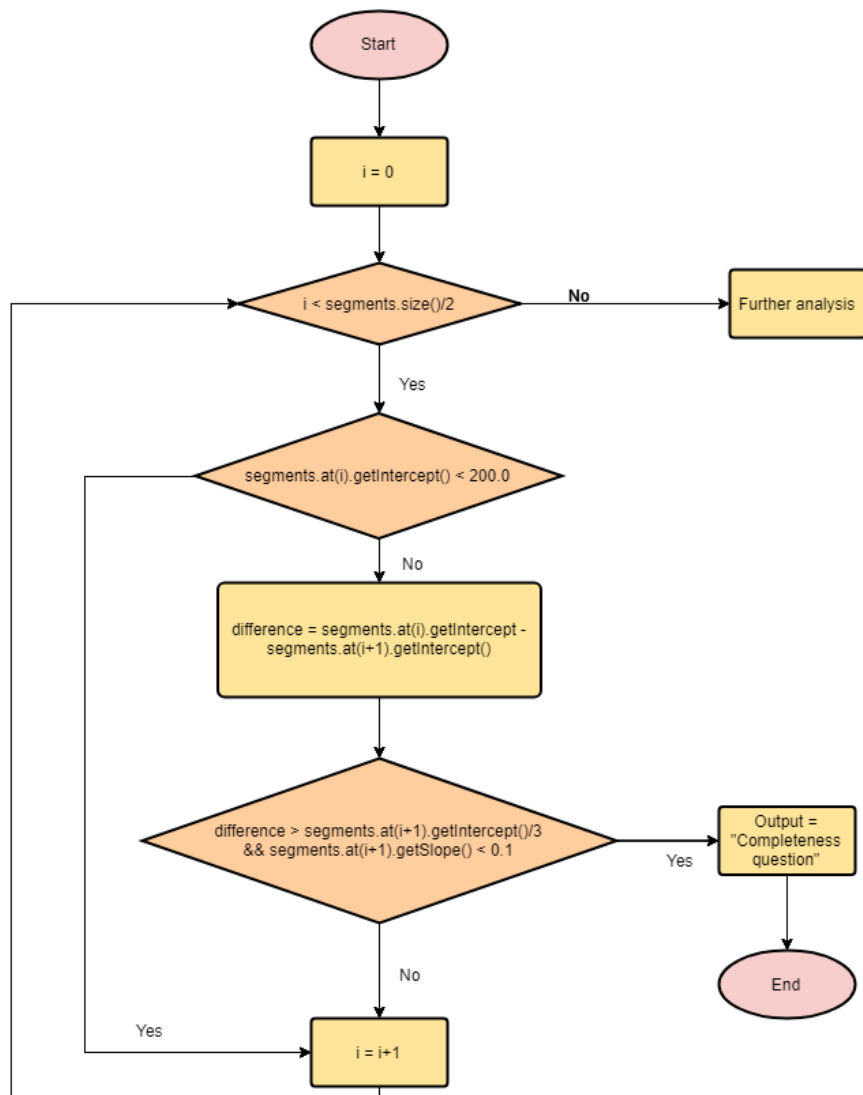
Rysunek 15: Pytanie dopełnienia zadane przez mężczyznę

Pytanie, którego intonacja została przedstawiona na rysunku 13, zostało wypowiedziane przez mężczyznę. Jego treść to "Jak zostać marynarzem?". Na pierwszy rzut oka zauważalny jest pierwszy segment, którego wartości górują nad resztą wykresu. W wypowiedzianym pytaniu, duży nacisk intonacyjny został nałożony na zaimek pytajny, po czym nastąpił znaczny spadek wartości F_0 . Cała intonacja jest wyraźnie opadająca. Jako, że zaimek występujący w tym zdaniu składa się jedynie z trzech liter, odpowiadający mu segment również jest krótki. Istotne jest również to, że wartości kolejnych segmentów są mniejsze aż o 80-140Hz w porównaniu do segmentu położonego najwyżej.



Rysunek 16: Pytanie dopełnienia zadane przez mężczyznę

Treść pytania przedstawionego na rysunku 16 brzmi "Czego Cię to nauczyło?". Również zostało wypowiedziane przez mężczyznę. W tym pytaniu także najwyżej położony segment jest znacznie większy od pozostałych. Nacisk położony na zaimek pytajny jest wyraźnie widoczny.

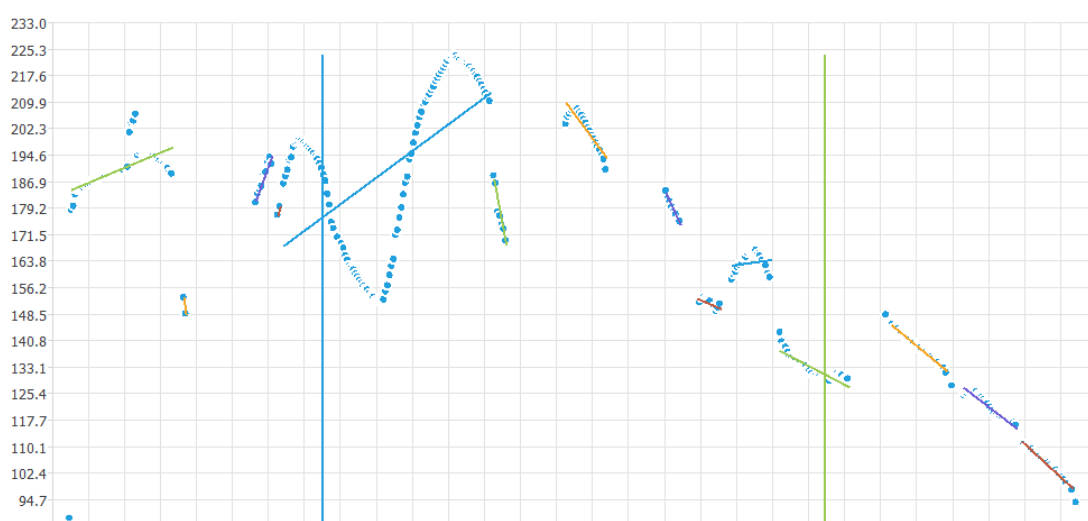


Rysunek 17: Schemat rozpoznawania pytań dopełnienia

Rysunek 17 przedstawia schemat rozpoznawania pytań dopełnienia. Ten rodzaj wypowiedzi charakteryzuje się wysokimi wartościami intonacji na początku wypowiedzi, zazwyczaj towarzyszy im późniejszy znaczny spadek wartości. Pod uwagę brana jest pierwsza połowa zbioru segmentów. Najpierw program sprawdza czy dany segment jest położony wystarczająco wysoko. W przeciwnym razie segment ten zostaje ominięty. Następnie obliczona zostaje różnica w położeniu między sąsiadującymi segmentami. Aby zdanie zostało sklasyfikowane jako pytanie dopełnienia, różnica między nimi musi być większa niż wartość położenia niżej znajdującego się segmentu, podzielona na trzy. Zauważono, że z racji dużych różnic między wartościami F0 uzyskiwanymi dla kobiet i mężczyzn, takie porównanie jest wydajniejsze niż porównywanie ze stałą wartością. Dodatkowym warunkiem klasyfikacji jest brak rosnącej tendencji niżej położonego segmentu.

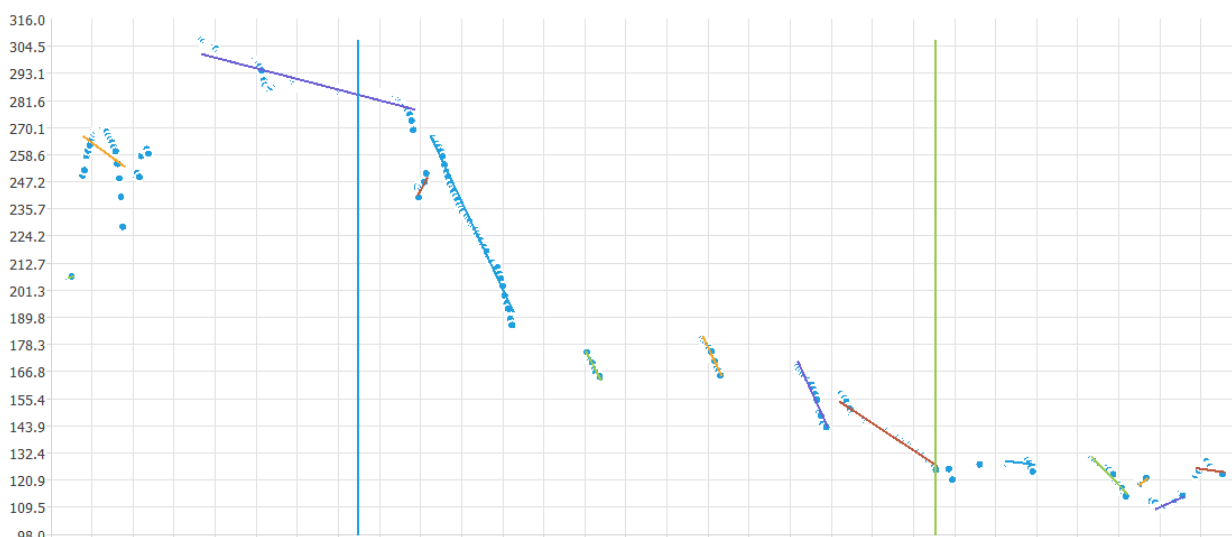
3.3 Zdania rozkazujące

Dla zdań twierdzących oraz pytań dopełnienia charakterystyczna jest obecność krótkich segmentów o wysokich wartościach zlokalizowanych na początku przebiegu intonacji. W przypadku pytań rozstrzygnięcia, taki charakterystyczny segment obecny był na końcu wypowiedzi. W zdaniach nakazujących komus wykonanie jakiej czynności, kładziony jest silny akcent na czasownik. W skutek tego, najczęściej segmenty o największych wartościach F0 zlokalizowane są w centralnej części przebiegu intonacji, lub zaczynają się w początkowej części, kończąc w środkowej. Z racji nałożonego na nie akcentu, dość często są najdłuższymi segmentami w danej wypowiedzi. W tym przypadku funkcja gramatyczna intonacji przeplata się z funkcją podkreślającą znaczenie danego słowa.



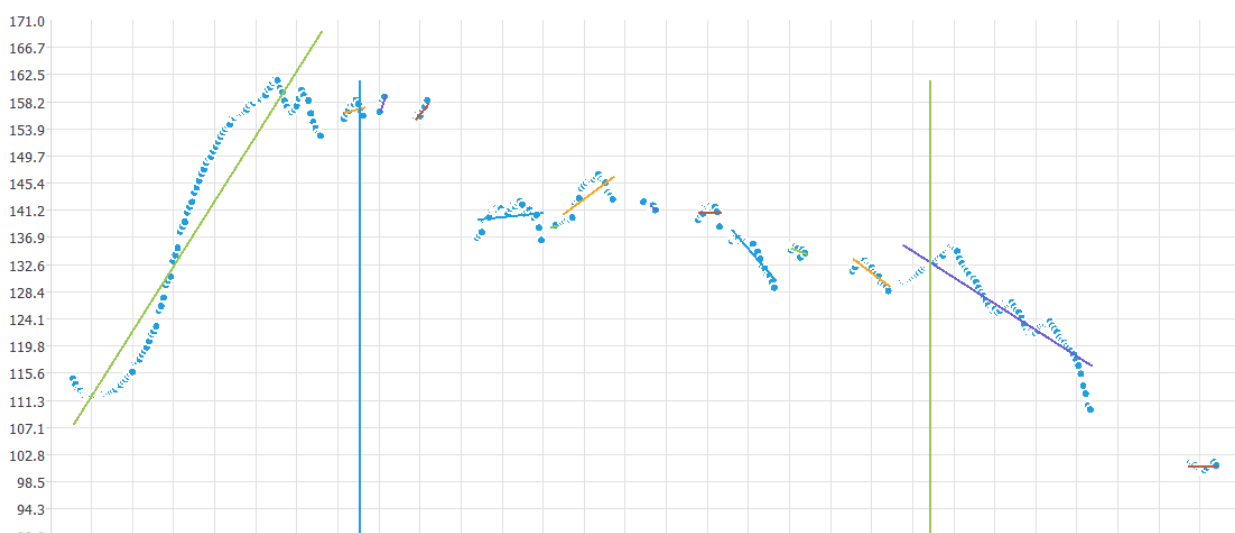
Rysunek 18: Zdanie rozkazujące wypowiedziane przez mężczyznę

Zdanie przedstawione na rysunku 18 zostało wypowiedziane przez mężczyznę, a jego treść brzmi "Nie próbujcie tego w domu". Wyraźny akcent w tej wypowiedzi jest położony na drugie słowo, sylaby w czasowniku są wręcz przeciągnięte, a więc wykorzystany został również iloczas. Na skutek tego omawiany segment poza największymi wartościami, odznacza się również długością. Jest położony w większości w centralnej części przebiegu intonacji. Kolejną zauważalną cechą jest jego gwałtowny wzrost, zakończony krótkim spadkiem.



Rysunek 19: Zdanie rozkazujące wypowiedziane przez kobietę

Zdanie przedstawione na rysunku 19 zostało wypowiedziane przez kobietę, a jego treść brzmi "Wyciągnij ręce z kieszeni". Akcent intonacyjny ponownie nałożony jest na czasownik w trybie rozkazującym, lecz tym razem jedynie na jego drugą oraz trzecią sylabę. Po pierwszej zauważalna jest krótka pauza. W tym przypadku najistotniejszy segment jest opadający, co pokazuje, że nie zawsze jest rosnący jak w poprzednim przykładzie i nie może być ta właściwość traktowana jako powszechna cecha.



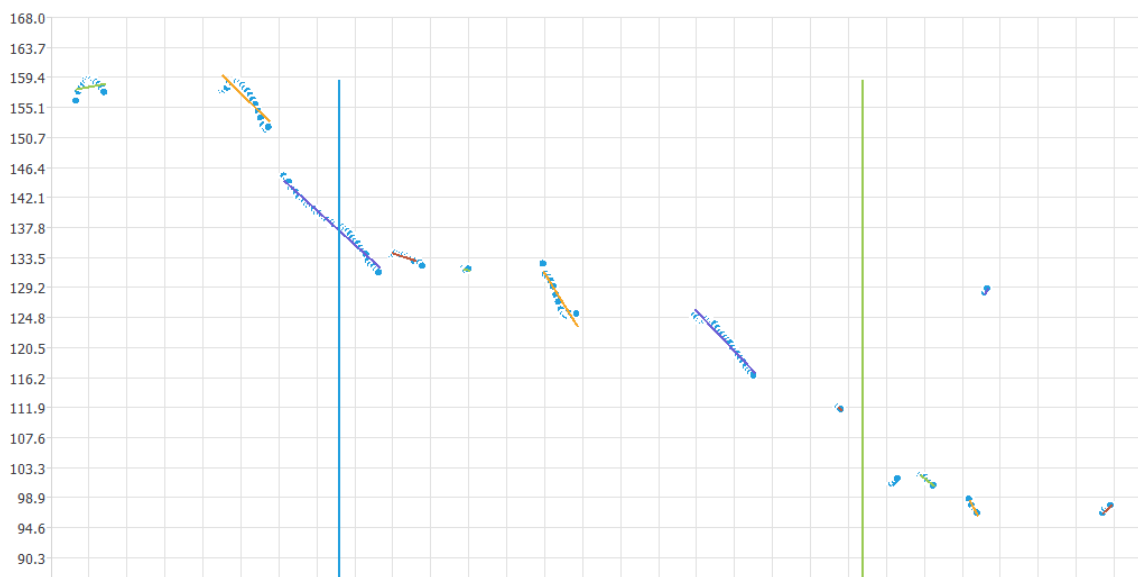
Rysunek 20: Zdanie rozkazujące wypowiedziane przez mężczyznę

Zdanie przedstawione na rysunku 20 zostało wypowiedziane przez mężczyznę, brzmi "Wyłącz w końcu ten telewizor". W tym przypadku segment zawierający największe wartości w całości zlokalizowany jest w początkowej części przebiegu. Jako, że jego wartości nie są znacząco większe od wartości segmentów zlokalizowanych w części centralnej, wypowiedź ta mogłaby zostać sklasyfikowana jako zdanie twierdzące. Decydująca w przy-

padku tej wypowiedzi była długość najistotniejszego segmentu oraz zakres jego wartości. Proporcjonalnie do całego konturu, są one znacznie większe niż odpowiedniki zaobserwowane podczas analizy zdań twierdzących.

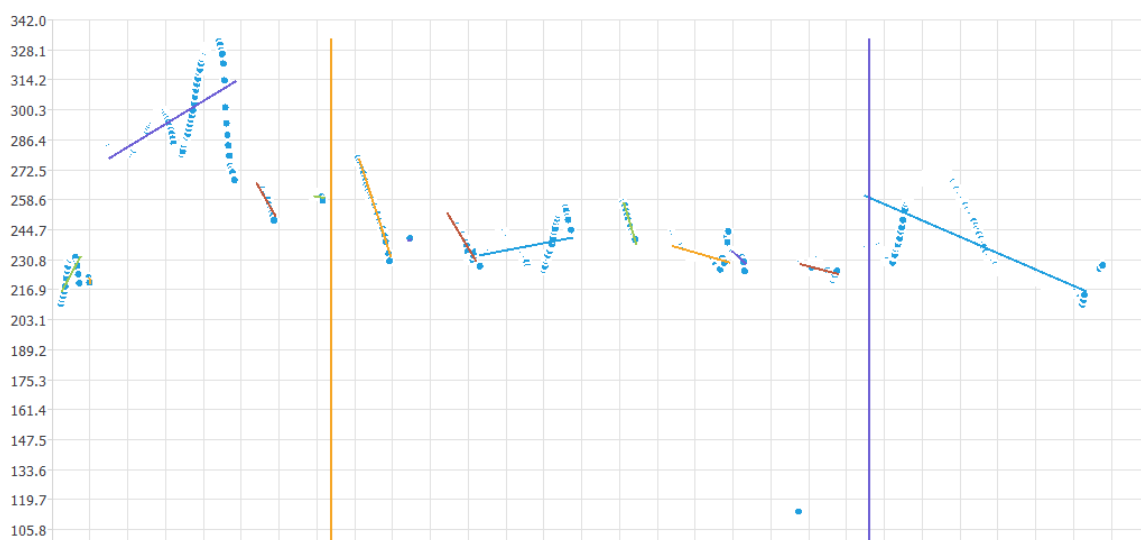
3.4 Zdania twierdzące

Badając nagrania zawierające ten typ wypowiedzi, zaobserwowany został opadający lub stały przebieg intonacji. W niektórych przypadkach występował również wzrost intonacji w początkowej części wypowiedzi, po którym następował delikatny spadek. Charakterystyczny dla tego rodzaju zdań był brak gwałtownych spadków wartości F_0 między kolejnymi segmentami. W przypadku opadającego przebiegu intonacji, spadek wartości ma łagodny charakter.



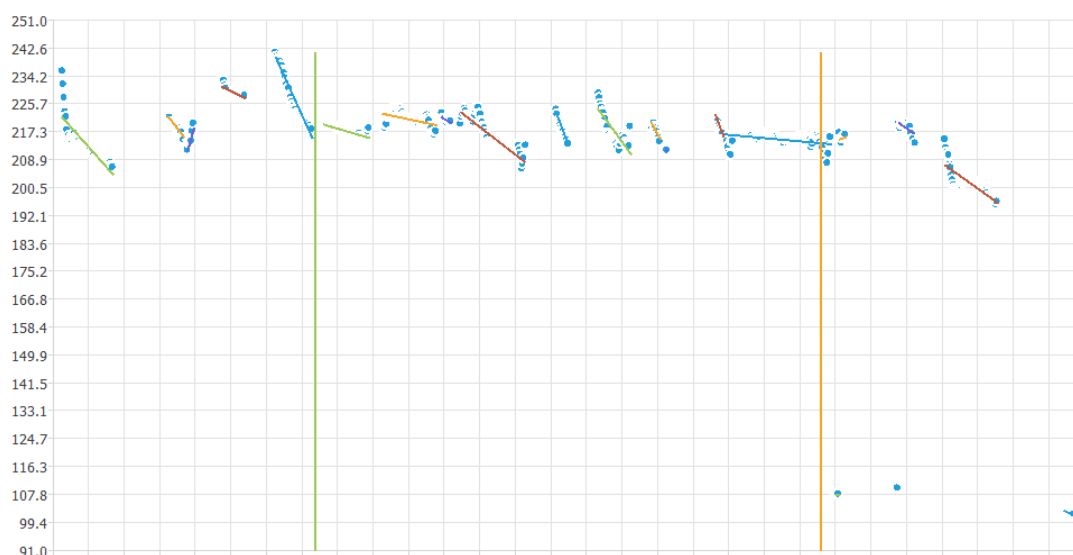
Rysunek 21: Zdanie twierdzące wypowiedziane przez mężczyznę

Zdanie przedstawione na rysunku 15 zostało wypowiedziane przez mężczyznę, a jego treść brzmi "W zeszłym roku ten las wycięto". Największe wartości intonacji zostały zauważone dla słów "W zeszłym" lecz spadek wartości dla segmentów odpowiadających kolejnym słowom jest dość łagodny. Dopiero ostatnie słowo ma wyraźnie niższą intonację. Główną cechą zdań twierdzących pozwalających rozróżnić ten rodzaj wypowiedzi od pytań dopełnienia jest niewielka różnica między wartościami najwyższego segmentu, a otaczającymi segmentami. W przypadku pytań dopełnienia ta różnica potrafiła wynosić nawet 100Hz i znacznie wykraczać poza typowy zakres częstotliwości. Ten przebieg intonacji jest wręcz idealnym przykładem zdania twierdzącego, wartości każdego segmentu są mniejszego od segmentu poprzedniego, przy tym nie występują gwałtownego spadki między nimi oraz wszystkie segmenty są opadające.



Rysunek 22: Zdanie twierdzące wypowiedziane przez kobietę

Kolejny przykład zdania twierdzącego, przedstawiony na rysunku 16, został wypowiedziany przez kobietę, a jego treść brzmi "Coraz więcej takich przypadków wychodzi na światło dzienne". Między pierwszym, a drugim słowem nastąpił wzrost intonacji, osiągającej swoje apogeum w drugim słowie, następnie odnotowany został delikatny spadek wartości, między ostatnią wartością tego segmentu, a pierwszą kolejnego. Po tym spadku reszta intonacji utrzymywała stałą tendencję, wartości pozostałych segmentów oscylowały między 230-250Hz. Ponownie, nie zauważono gwałtownego spadku lub znacznego górowania najwyższej położonego segmentu nad resztą segmentów.



Rysunek 23: Zdanie twierdzące wypowiedziane przez kobietę

Przykład przedstawiony na rysunku 17, przedstawia przebieg intonacji zdania twierdzącego, wypowiedzianego przez kobietę, którego treść brzmi "Więc to też naraża ich na

niebezpieczeństwo”. Przebieg intonacji ma wyraźnie stałą tendencję. Najwyżej położony segment również znajduje się w początkowej części wypowiedzi, lecz nie sposób tutaj mówić o znaczącej różnicy. Stała tendencja przebiegu intonacji jest jedną z cech wyraźnie wskazujących, że dana wypowiedź jest zdaniem twierdzącym.

4 Porównanie wyników otrzymanych z wykorzystaniem YIN i Praata

5 Wnioski

Uzyskane rezultaty można rozpatrywać dwustopniowo. Program uzyskuje zadowalającą skuteczność w rozpoznawaniu obu rodzajów pytań. Zaobserwowane zmiany w intonacji towarzyszącej pytaniom są wystarczające dla poprawnego rozpoznania w zdecydowanej większości przypadków. Potwierdza to dotychczasowe badania wykonane w tym zakresie.

Poprawność klasyfikacji proponowaną metodą znacznie spada gdy rozróżnianiu poddawane są zdania twierdzące oraz rozkazujące. Oba rodzaje wypowiedzi mogą cechować się intonacją opadającą oraz niewielkimi różnicami między kolejnymi segmentami. Brak wyraźnych różnic między tymi rodzajami sprawia, że zadanie klasyfikacji jest utrudnione. Niemniej jednak, zaobserwowano kilka cech odróżniających je od siebie. Efekty jednak nie są tak skuteczne jak w przypadku pytań.

W celu kontynuacji badań, jako pierwszy krok należałoby rozważyć zwiększenie bazych nagrań zdań rozkazujących, aby zwiększyć ilość cech mogących odróżniać je od zdań twierdzących.

Literatura

- [1] Terapia mowy [Online] [Dostęp 05.02.2019] <http://terapiamowy.com/index.php/niedowlad-krtani/>
- [2] Three parts of speech [Online] [Dostęp 10.02.2019] <https://uiowa.edu/voice-academy/three-parts-speech>
- [3] Fernando Trujillo, The Production of Speech Sounds, English Phonetics and Phonology
- [4] Zhaoyan Zhang, Mechanics of human voice production and control [Online] [Dostęp 01.03.2019] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5412481/>
- [5] The prosody of speech: Melody and rythm, Sieb Nooteboom, 1997, Utrecht University
- [6] Thornbury, Scott.: (2006). An A-Z of ELT. Oxford: Macmillan Publishers, Ltd.
- [7] Martine Grice and Stefan Baumann, An introduction to intonation-functions and models, Ifl Phonetik and Universität Köln(2007)
- [8] Daniel Hirst Albert François di Cristo, A survey of intonation systems, 1998
- [9] Prieto, P., and Roseano, P. (2018). Prosody: Stress, Rhythm, and Intonation. In K. Geeslin (Ed.), The Cambridge Handbook of Spanish Linguistics (Cambridge Handbooks in Language and Linguistics, pp. 211-236)
- [10] Definition of phoneme, <https://www.britannica.com/topic/phoneme>, [Online][Dostęp 10.03.2019]
- [11] Bogusław Dunaj: Dwa dyskusyjne problemy polskiej fonologii. W: Prace językoznawcze 19. Studia polonistyczne. Alina Kowalska, Aleksander Wilkoń (red.). Katowice: Uniwersytet Śląski, 1991, s. 40–46, seria: Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach.
- [12] Hollien, H., and Ship, T. (1972) "Speaking fundamental frequency and chronological age in males," J. Speech Hear. Res. 15, 155–159
- [13] Pegoraro-Krook, M. 1. (1988). "Speaking fundamental frequency characteristics of normal Swedish subjects obtained by glottal frequency analysis," Folia Phoniatica 40, 82–90

- [14] Gilbert, H.R., and Weismer, G.G. (1974). “The effects of smoking on the speaking fundamental frequency of adult women,” J. Psycholing. Res. 3, 225–231.
- [15] What is Formant? https://ec-concord.ied.edu.hk/phonetics_and_phonology/wordpress/learning_
[Online][Dostep 10.04.2019]
- [16] Kawahara H., de Cheveigne A. YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music, 2002