

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

1	Wstęp	3
2	Cel pracy	4
3	Wprowadzenie teoretyczne	5
3.1	Sygnał mowy	5
3.1.1	Powstawanie mowy	5
3.1.2	Rejestrowanie sygnału mowy	6
3.1.3	Parametryzacja	7
3.2	Ton podstawowy	9
3.2.1	Definicja tonu podstawowego	9
3.2.2	Przegląd metod estymacji	9
3.2.3	Definicja algorytmu YIN	10
3.2.4	Porównanie algorytmu z konkurencyjnymi metodami	10
3.2.5	Opis działania algorytmu	11
3.3	Intonacja	13
3.3.1	Typy intonacji	13
3.3.2	Przebiegi intonacji dla poszczególnych rodzajów zdań	13
3.4	Regresja liniowa	16
3.5	Metoda najmniejszych kwadratów	17
4	Implementacja detekcji konturów częstotliwości podstawowej	18
4.1	Język programowania oraz środowisko	18
4.2	Opis możliwości aplikacji	18
4.3	Wczytanie próbki	19
4.4	Ekstrakcja tonu podstawowego	20
4.4.1	Ramkowanie oraz ekstrakcja wartości F0	21
4.5	Wykrywanie konturów	23
4.5.1	Analiza wstępna wykrytego konturu	25
4.5.2	Współczynniki regresji liniowej	30
5	Analiza wykrytych konturów	31

Spis rysunków

1	Faldy głosowe	6
---	-------------------------	---

2	Nagranie słów "drewniany stół". Sygnał po normalizacji, przed usunięciem ciszy	7
3	Rozkład energii dla przykładowego nagrania słów "drewniany stół"	8
4	Przebieg widma sygnału dla przykładowego nagrania słów "drewniany stół"	9
5	Wyniki porównania metod estymacji, dokonanego przez twórców algo- rytmu YIN	10
6	Przebieg konturów intonacyjnych dla zdania „Intonacja w zdaniach twier- dzących jest opadająca”. Próbkowanie 44kHz, estymacja z wykorzystaniem algorytmu YIN	14
7	Przykład pytania o uzupełnienie : „Jaką intonację ma to pytanie?” . . .	15
8	Jest to pytanie odwrócone, które brzmi „A w Belgii?”	15
9	Przykład pytania nawiązującego upewnienie : „Kiedy?”	16
10	Przykład regresji liniowej	17
11	Zobrazowany podział sygnału na ramki wraz zastosowaniem 30-procentowego overlappingu. Opracowanie własne	21
12	Klasa stworzona w celu ekstrakcji F0, obliczenia energii sygnału oraz prze- chowywania tych wartości	22
13	Klasy stworzone do wykrycia poszczególnych konturów intonacyjnych, na podstawie wszystkich wartości F0	24
14	Przykładowy przeskok(wzrost) między pierwszym i drugim konturem, zlo- kalizowanymi w początkowej części	27
15	Przykład usuniętego konturu.	29
16	Przykład podziału przebiegu intonacji na 3 części	30
17	Fragment przebiegu intonacji przed i po nałożeniu linii regresji	30

Spis tablic

List of equations

1	Filtracja preemfazy, $a=0.97$	7
2	Energia sygnału, W = liczba próbek w ramce	8
3	Funkcja różnicowa	11
4	Pierwszy element równania funkcji różnicowej	12
5	Drugi element równania funkcji różnicowej	12
6	Współczynnik kierunkowy prostej	17
7	Współczynnik kierunkowy prostej	17

1 Wstep

2 Cel pracy

3 Wprowadzenie teoretyczne

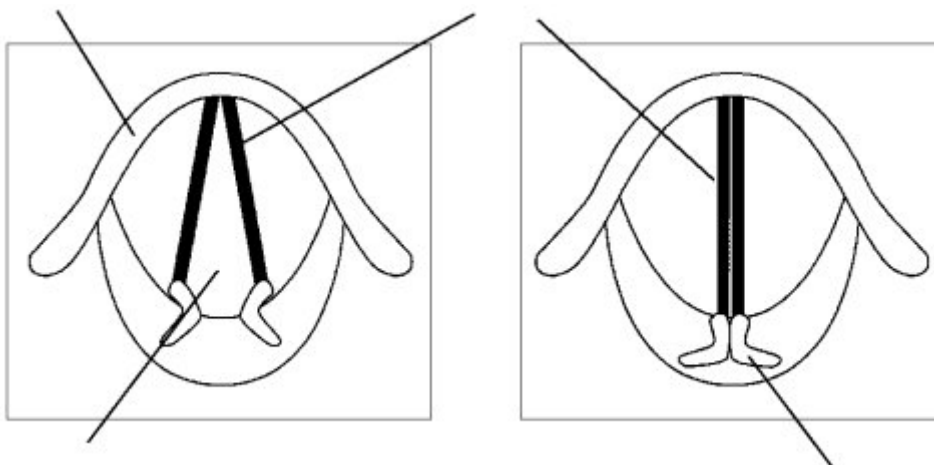
3.1 Sygnał mowy

Mową określamy komunikowanie się między sobą ludzi, za pomocą ukształtowanego zbioru dźwięków i reguł, zwanego językiem. Produkcja mowy jest wielokrokovym procesem zamiany myśli w ustną wypowiedź, która może być zarejestrowana jako sygnał mowy.

3.1.1 Powstawanie mowy

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



Rysunek 1: Fałdy głosowe

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.

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.

3.1.2 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

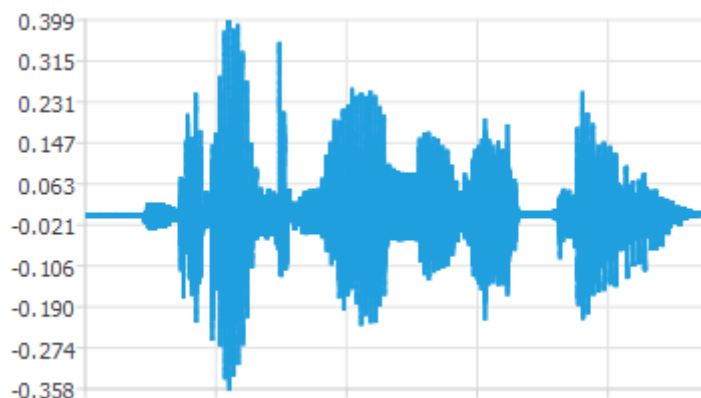
podczas przetwarzania sygnału. Kanały w wersji stereofonicznej mogą różnić się od siebie wartościami próbek, zwłaszcza w widmie sygnału.

3.1.3 Parametryzacja

Po uzyskaniu sygnału cyfrowego, w dalszym toku analizy dźwięku, podejmowane są kroki przygotowawcze do parametryzacji, zwane przetwarzaniem wstępnym.

Między innymi usuwana jest cisza z początku i końca nagrania oraz przeprowadzana jest normalizacja.

Normalizacja może być przeprowadzona na dwa sposoby. Jeden z nich polega na uzyskaniu próbki o największej wartości w całym sygnale, a następnie podzieleniu wszystkich próbek przez tę maksymalną wartość. Zbiór nowych wartości będzie się mieścił w przedziale $<-1;1>$. Innym podejściem jest podzielenie próbek sygnału przez maksymalną wartość ich typu.



Rysunek 2: Nagranie słów "drewniany stół". Sygnał po normalizacji, przed usunięciem ciszy

Najczęściej oznacza to podzielenie przez 32167, jako że jest to maksymalna wartość typu short int, zazwyczaj używanego do przechowywania próbek sygnału. Jako jeden z kroków przetwarzania wstępnego stosowana jest również filtracja preemfazy, której celem jest uwypuklenie wysokich częstotliwości kosztem składowych o niskich częstotliwościach.

$$x'_n = x_n - a * x_{n-1} \quad (1)$$

Filtracja preemfazy, $a=0.97$

Ostatnim etapem przetwarzania wstępnego jest segmentacja, zwana również ramkowaniem. Sygnał jest dzielony na 20 milisekundowe ramki (frames). Ramki nachodzą na

siebie, w celu uniknięcia utraty jakichkolwiek danych (overlapping). Wielkość zachodzenia powinna wynosić co najmniej 1/3 długości ramki. Tak przygotowany sygnał może być poddany parametryzacji, zwanej inaczej ekstrakcją cech. Proces ten ma na celu uzyskanie wektora parametrów dotyczących ramki sygnału.

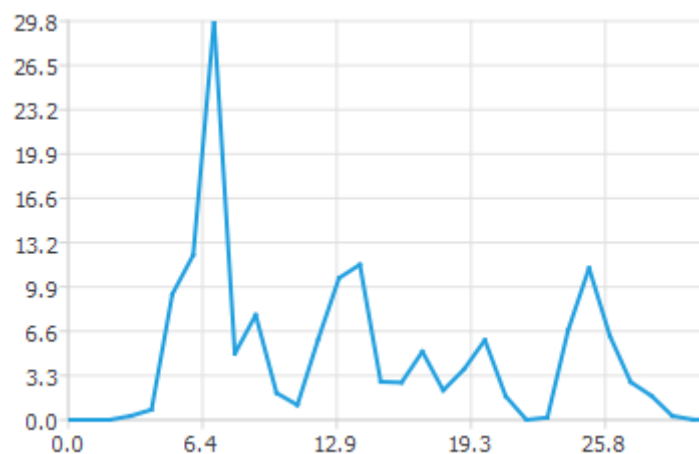
Parametry dzielimy na czasowe i widmowe. Do cech czasowych zalicza się:

1. Energia, będąca sumą wszystkich próbek w danej ramce, podniesionych do kwadratu. Jest istotną cechą w procesie mającym na celu rozpoznanie mówcy.

Obliczana wzorem:

$$\sum_{i=0}^W x_i^2 \quad (2)$$

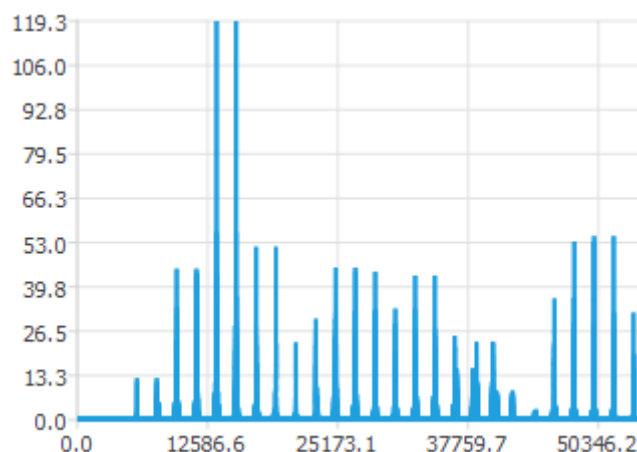
Energia sygnału, W= liczba próbek w ramce



Rysunek 3: Rozkład energii dla przykładowego nagrania słów "drewniany stół"

2. Zero-crossing rate - ilość przejść przez zero (pare zdań do dodania w tym miejscu)

Znacznie więcej korzyści można zyskać analizując widmowe parametry. Najpierw jednak konieczne jest uzyskanie widma sygnału, które najczęściej obliczane jest przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Sygnał w takiej postaci może zostać poddany analizie częstotliwościowej.



Rysunek 4: Przebieg widma sygnału dla przykładowego nagrania słów "drewniany stół"

3.2 Ton podstawowy

3.2.1 Definicja tonu podstawowego

W literaturze własność bywa również nazywana częstotliwością podstawową lub po prostu oznaczana jest jako F_0 . W zależności od potrzeb, ton podstawowy bywa różnie definiowany. W kontekście przetwarzania sygnału mowy rozumiany jest jako vibracje strun głosowych, towarzyszące powstawaniu głosek dźwięcznych. Przebieg częstotliwości podstawowej w dużym stopniu odzwierciedla intonację wypowiedzi. 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. Jednak sygnał mowy jest sygnałem bardzo dynamicznym, co sprawia, że estymacja F_0 przestaje być zadaniem trywialnym. Dodatkowo transformacja sygnału analogowego do postaci dyskretniej, wiążąca się zawsze z utratą danych oraz towarzyszący nagraniemu głosowi szum wpływają negatywnie na dokładność estymacji.

3.2.2 Przegląd metod estymacji

Prowadzone badania nad częstotliwością podstawową doprowadziły do wynalezienia wielu algorytmów estymacji o różnej skuteczności, zarówno w dziedzinie czasowej jak i widmowej. Przykłady metod czasowych:

1. Analiza funkcji autokorelacji, polegająca na badaniu korelacji między danymi wejściowymi sygnału przy różnych opóźnieniach. Implikuje to wiele operacji mnożenia oraz dodawania. Estymacja F_0 z wykorzystaniem tej metody związana jest z wy-

krywaniem maksimów lokalnych funkcji autokorelacji.

2. AMDF (Average Magnitude Difference Function) będąca odmianą funkcji autokorelacji. Polega na analizie relacji sygnału do jego opóźnionej w czasie wersji. Jako, że nie występują tu operacje mnożenia, złożoność czasowa tego algorytmu jest niższa.

Przykładem metody widmowej jest metoda cepstralna. „W metodzie tej obliczana jest odwrotna transformata Fouriera logarytmu widna amplitudowego analizowanej ramki sygnału wg wzoru:” Dzięki analizie pozycji maksimum w dziedzinie cepstralnej, możliwe jest oszacowanie F0.

3.2.3 Definicja algorytmu YIN

Metody widmowe umożliwiały lepszą dokładność estymacji częstotliwości podstawowej, do momentu opracowania algorytmu 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. 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. Ważną własnością jest fakt, że algorytm ten jest relatywnie prosty, co pozwala na efektywną implementację, bez dużych opóźnień. Na jego prostotę istotnie wpływa niewielka liczba wymaganych parametrów.

3.2.4 Porównanie algorytmu z konkurencyjnymi metodami

Najważniejszą własnością algorytmu jest bardzo niska stopa błędów.

Method	Gross error (%)					(low/high)
	DB1	DB2	DB3	DB4	Average	
pda	10.3	19.0	17.3	27.0	16.8	(14.2/2.6)
fxac	13.3	16.8	17.1	16.3	15.2	(14.2/1.0)
fxcep	4.6	15.8	5.4	6.8	6.0	(5.0/1.0)
ac	2.7	9.2	3.0	10.3	5.1	(4.1/1.0)
cc	3.4	6.8	2.9	7.5	4.5	(3.4/1.1)
shs	7.8	12.8	8.2	10.2	8.7	(8.6/0.18)
acf	0.45	1.9	7.1	11.7	5.0	(0.23/4.8)
naef	0.43	1.7	6.7	11.4	4.8	(0.16/4.7)
additive	2.4	3.6	3.9	3.4	3.1	(2.5/0.55)
TEMPO	1.0	3.2	8.7	2.6	3.4	(0.53/2.9)
YIN	0.30	1.4	2.0	1.3	1.03	(0.37/0.66)

Rysunek 5: Wyniki porównania metod estymacji, dokonanego przez twórców algorytmu YIN

Do oszacowania stopy błędów autorzy algorytmu użyli laryngografu – urządzenia, które umożliwia rejestrowanie wibracji strun głosowych, za pomocą elektrod umieszczanych na krtani. Jako błędne uznawane były wartości uzyskane za pomocą każdej z metod, które różniły się o więcej niż 20 procent od wartości uzyskanych za pomocą laryngografu. Wyniki porównano dla 11 różnych metod, działających zarówno w dziedzinie czasowej, jak i widmowej. Testowane były dla różnych baz nagrań.

Pierwsza baza (DB1) zawiera 14 głosów męskich oraz 14 głosów żeńskich, każda z osób wypowiedziała 30 zdań w języku japońskim. Na drugą bazę składa się 1 głos męski oraz 1 głos żeński, obie osoby wypowiedziały 50 zdań w języku angielskim. Trzecią bazę stanowią nagrania 2 kobiet oraz 2 mężczyzn, wypowiadających po 50 zdań w języku francuskim. Czwarta baza składa się ze zdań oraz pojedynczych słów, nagranych przez 2 mężczyzn posługujących się językiem angielski oraz mężczyznę i kobietę, używających języka japońskiego. Wyniki mniejsze od 20 % od wartości prawidłowych sklasyfikowane zostały jako low errors, oraz jako high errors w przeciwnym przypadku. Średnia stopa błędów algorytmu YIN okazała się niższa 3-krotnie od najlepszych z pozostałych metod oraz 5-krotnie od funkcji autokorelacji, na której algorytm ten jest bazowany. Funkcja autokorelacji zbyt często zawyżała wynik (high = 4.8). Stopień błędów zależy od ustalonego progu tolerancji. Dla progu 20 % stopa błędów dla YIN wynosi 1%, dla progu 5% wynik ten wynosi 6%, a gdy poprzeczka zostaje obniżona do 1%, YIN wciąż myli się tylko w 40% przypadków, co jest również wynikiem zdecydowanie lepszym od pozostałych metod. Wyniki otrzymane dla wąskiego zakresu częstotliwości mogłyby się różnić nieznacznie na korzyść innych metod, mogących się w takowych specjalizować, jako że badanie te zostało wykonane dla szerokiego zakresu częstotliwości (40 – 800 Hz).

3.2.5 Opis działania algorytmu

1. Pierwszym krokiem algorytmu jest obliczenie funkcji różnicowej, będącej zmodyfikowaną wersją funkcji autokorelacji. Maksima lokalne (w literaturze anglojęzycznej określane jako „peaks”) znajdujące się za pomocą wzoru:

$$d_t(\tau) = r_t(0) + r_{t+\tau}(0) - 2 * r_t(\tau) \quad (3)$$

Funkcja różnicowa

We wzorze tym $r_t(0)$ jest sumą podniesionych do kwadratu wartości sygnału, obliczaną w następujący sposób:

$$\sum_{i=0}^{W-1} x_i^2 \quad (4)$$

Pierwszy element równania funkcji różnicowej

Literą W w tych wzorach oznaczona jest połowa ilości próbek w ramce. Kolejny element zawarty w głównym wzorze, $r_{t+\tau}(0)$ obliczany jest na bazie r_t wg wzoru:

$$\sum_{i=1}^{W-1} r_{i-1} - x_{i-1}^2 + x_{i+W}^2 \quad (5)$$

Drugi element równania funkcji różnicowe

Ostatnią składową potrzebną do obliczenia wartości funkcji różnicowej jest podwojone r_t . Dla lepszych rezultatów wartość ta może zostać obliczone z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera. Krok ten jest ma największy wpływ na obniżanie stopy błędów estymacji. Wyniki uzyskane po pierwszym etapie algorytmu już są znacząco dokładniejsze w porównaniu do wartości uzyskanych za pomocą czystej funkcji autokorelacji. Wpływ ma na to fakt, że autokorelacja ma tendencję do zawyżania wartości maksimów lokalnych wraz ze wzrostem wartości czasu. W funkcji różnicowej tendencja ta również występuje, choć w znacznie mniejszym stopniu i dotyczy sytuacji odwrotnej, zaniżania wartości maksimów.

2. Aby zlikwidować te zaburzenia wyniki uzyskane za pomocą funkcji różnicowej poddawane są modyfikacji. Stosowana jest normalizacja skumulowana, której celem jest uśrednienie bieżącej wartości przez sumę poprzedzających wartości, podzielonych przez wartość bieżącego opóźnienia. Krok ten sprawia, że YIN nie posiada górnego limitu częstotliwości.

$$d'_t(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{if } \tau = 0 \\ d_t(\tau) / [(1/\tau) * \sum_{j=1}^{\tau} d_t(j)] \end{cases}$$

3. Wartość progowa. Ten krok wraz z poprzednim odpowiedzialne są za ukierunkowanie algorytmu na poszukiwanie minimum, co jest przeciwieństwem do założeń funkcji autokorelacji. Algorytm wyszukuje pierwsze minimum lokalne, którego wartość jest mniejsza od ustalonego progu. Próg ten najczęściej wynosi 0.1 lub 0.15. Jeśli takie minimum nie istnieje, zamiast niego zwracane jest minimum globalne. Jest to kolejny krok w redukowaniu stopy błędów. Zmniejsza znacząco występowanie błędów zbyt niskiej estymacji.

4. Interpolacja paraboliczna. Stosuje się interpolowanie wartości pomiędzy próbkami otaczającymi znalezione minimum, aby znaleźć prawdziwe opóźnienie, nie będące liczbą całkowitą, dla którego minimum wystąpiło. Krok ten ma niewielki wpływ na ogólny rezultat działań, jednak wpływ ten wciąż może być istotny w niektórych zastosowaniach.
5. Estymacja lokalna

Na podstawie tak wyestymowanego tonu podstawowego, można dokonać analizy intonacji.

3.3 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?

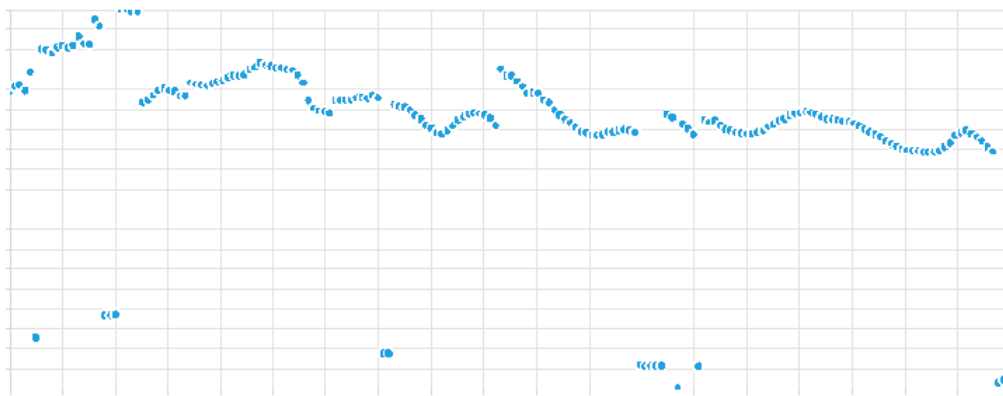
Jako, że taki szyk zarówno zdania jak i pytania jest całkowicie poprawny w języku polskim, bez nadania wypowiedzi odpowiedniej intonacji odbiorca nie jest w stanie zrozumieć intencji osoby mówiącej.

3.3.1 Typy intonacji

Najczęściej rozróżniane są dwa typy intonacji, opadająca oraz rosnąca. Opadająca, zwana kadencją zwyczajowo kojarzona jest ze zdaniami twierdzącymi, natomiast intonacja rosnąca, znana jako antykadencja, określana jest jako pytanie. W rzeczywistości podział nie jest tak klarowny. Należy wziąć również pod uwagę kontury z intonacją będącą połączeniem dwóch podstawowych zmian, czyli intonację rosnąco – opadającą oraz opadająco – rosnącą. Rozróżniany jest również brak wyraźnych zmian w przebiegu tonu podstawowego, zwany progrediencją. Jest on charakterystyczny dla tekstu czytanego.

3.3.2 Przebiegi intonacji dla poszczególnych rodzajów zdań

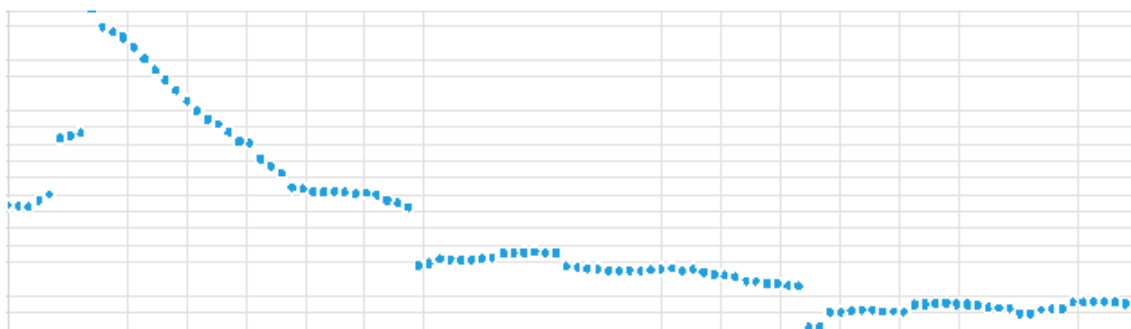
Ogólna tendencja tonu podstawowego dla zdań twierdzących jest rzeczywiście spadkowa. Powodowane jest to najprawdopodobniej kładzeniem większego akcentu na pierwszą część zdania, zwłaszcza na pierwszy wyraz



Rysunek 6: Przebieg konturów intonacyjnych dla zdania „Intonacja w zdaniach twierdzących jest opadająca”. Próbkowanie 44kHz, estymacja z wykorzystaniem algorytmu YIN

W pytaniach sytuacja ma się jednak inaczej, wbrew opinii powtarzanej w wielu źródłach, nie można wprost zakładać, że dla pytania intonacja będzie miała przebieg rosnący. Istnieje duża grupa pytań, dla których w tym przypadku intonacja również może mieć przebieg opadający lub będący połączeniem opadającego oraz rosnącego, w różnej kolejności. Powodowane jest to faktem, że w języku polskim rozróżniamy dwa rodzaje pytań. Wyróżnił je Kazimierz Ajdukiewicz w podręczniku „Logika Pragmatyczna” wydanym w 1965 roku. Na podział ten składają się:

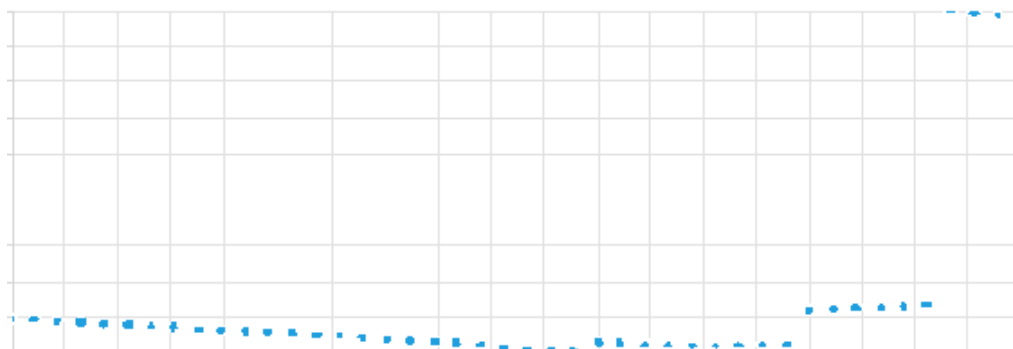
1. Pytania rozstrzygnięcia. Są to pytania, na które można udzielić odpowiedzi tak lub nie. Przykładem może być pytanie: „Czy byłeś dzisiaj w pracy?” Cechują się silną antykadencją, umiejscowioną zazwyczaj w ostatnim wyrazie. Mogą występować również bez partykuły „czy”, na przykład pytanie „Mógłbyś to zrobić?” również jest pytaniem rozstrzygnięcia. Poprawna klasyfikacja takiej wypowiedzi na podstawie intonacji jest zadaniem stosunkowo prostym.
2. Pytania uzupełnienia. Nazywamy tak pytania, na które nie można udzielić odpowiedzi twierdzącej lub przeczącej. W wypowiedziach tych, akcent intonacyjny, mogący wskazywać, że jest to pytanie kładziony jest na zaimek pytajny, będący najczęściej pierwszym wyrazem.



Rysunek 7: Przykład pytania o uzupełnienie : „Jaką intonację ma to pytanie?”

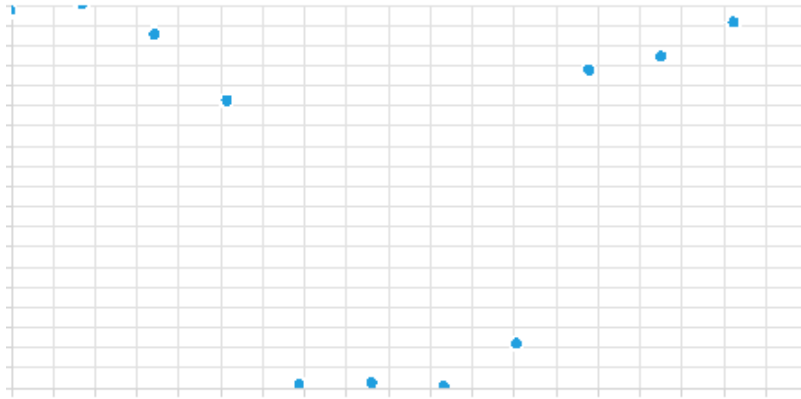
Silny wzrost intonacji występuje na samym początku sygnału, następnie widoczny jest niemal ciągły spadek. Istnieją również pytania o uzupełnienie, dla których wzrost intonacji ma swoje miejsce na końcu wypowiedzi, obrazując typową antykadencję:

- (a) Pytania odwrócone, np. W zeszłym roku byłem we Francji. A w Belgii? (= Kiedy byłeś w Belgii?)



Rysunek 8: Jest to pytanie odwrócone, które brzmi „A w Belgii?”

- (b) Antykadencja występuje także w pytaniach nawiązujących upewnienia. Występuje wówczas zarówno w pytaniach o rozstrzygnięcie, jak i o uzupełnienie, a jej funkcją jest domaganie się powtórzenia i potwierdzenia informacji, np. Byłem tam wczoraj. Kiedy? Wczoraj." [(Leokadia Dukiewicz, Irena Sawicka, "Fonetyka i fonologia", Kraków 1995)]



Rysunek 9: Przykład pytania nawiązującego upewnienie : „Kiedy?”

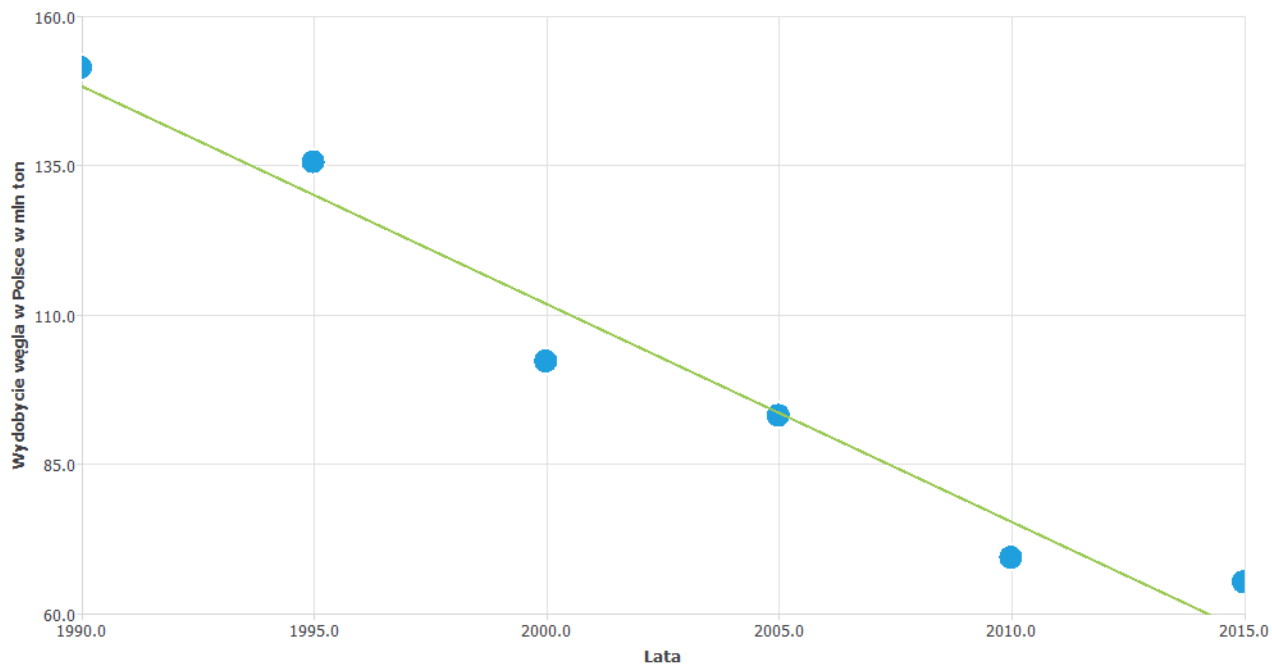
Przebieg intonacji dla takiego pytania jest opadająco-rosnący.

3.4 Regresja liniowa

Regresja liniowa jest statystyczną metodą służącą badaniu zależności między dwoma zmiennymi ciągłymi:

- zmienna X, zwana zmienną niezależną, lub objaśniającą
- zmienna Y, zwana zmienną zależną, lub objaśnianą

Pozwala na przewidywanie wartości zmiennej Y, na podstawie wartości zmiennej X. W tym celu konieczne jest obliczenie parametrów prostej $y = ax + b$, gdzie **a** oznacza współczynnik kierunkowy prostej, a **b** jest wyrazem wolnym. Celem uzyskanej prostej jest najlepsze oddanie zależności występującej między tymi zmiennymi. Oznacza to, że musi przebiegać w jak najbliższej możliwej odległości od każdego z punktów reprezentujących wartości zmiennej zależnej.



Rysunek 10: Przykład regresji liniowej

Na rysunku 10 przedstawiony został spadek wydobycia węgla na przestrzeni ostatnich 30 lat. Linia regresji nie przebiega przez każdy punkt, gdyż dane nie są wprost liniowe, lecz pokazuje ogólną tendencję danych. Odległość między wartością zmiennej zależnej, a wartością linii regresji w danym punkcie nazywana jest błędem oszacowania.

3.5 Metoda najmniejszych kwadratów

Jest to najczęściej stosowana metoda wyznaczania linii trendu. Dopasowuje ją do wartości zmiennej zależnej w taki sposób, aby ogólny błąd oszacowania był najmniejszy. W tym celu sumowane są kwadraty wszystkich obliczonych błędów oszacowania. W metodzie tej, parametry prostej wyznaczane są według następujących wzorów:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum y_i)^2} \quad (6)$$

Współczynnik kierunkowy prostej

$$b = \frac{1}{n} (\sum y_i - a \sum x_i) \quad (7)$$

Wyraz wolny

4 Implementacja detekcji konturów częstotliwości podstawowej

Celem praktycznym pracy jest stworzenie aplikacji desktopowej umożliwiającej wczytanie próbki zawierającej nagrane zdanie oraz dokonanie identyfikacji rodzaju tej wypowiedzi

4.1 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 wav. 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.

4.2 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 którego dana wypowiedź została sklasyfikowana. Po kliknięciu w tabeli na wybrany wiersz, a następnie po kliknięciu na jeden z dowolnych przycisków w dolnym pasku, program wyświetli na wykresie odpowiednio energię nagrania, przebieg widma, przebieg wartości próbki w dziedzinie czasu (waveform) lub przebieg wyestymowanej częstotliwości podstawowej.

4.3 Wczytanie próbki

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.

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

audioDecoder = new QAudioDecoder();
connect(audioDecoder, SIGNAL(bufferReady()), this, SLOT(readBuffer()));
connect(audioDecoder, SIGNAL(finished()), this, SLOT(decodingFinished()));
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.

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

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 1: Funkcja dodająca do wektora wszystkie odczytane próbki

```
void MainWindow::putValuesIntoVector()
```

```

{
    sampleRate = audioBuffers[0].format().sampleRate();
    frameSize = audioBuffers[0].format().sampleRate()/40;

    for (QAudioBuffer audioBuffer : audioBuffers)
    {
        const qint16 *data = audioBuffer.constData<qint16>();
        for(int j=0;j<audioBuffer.sampleCount();j++)
        {
            wholeBuffer.emplace_back(data[j]);
        }
        delete data;
    }
}

```

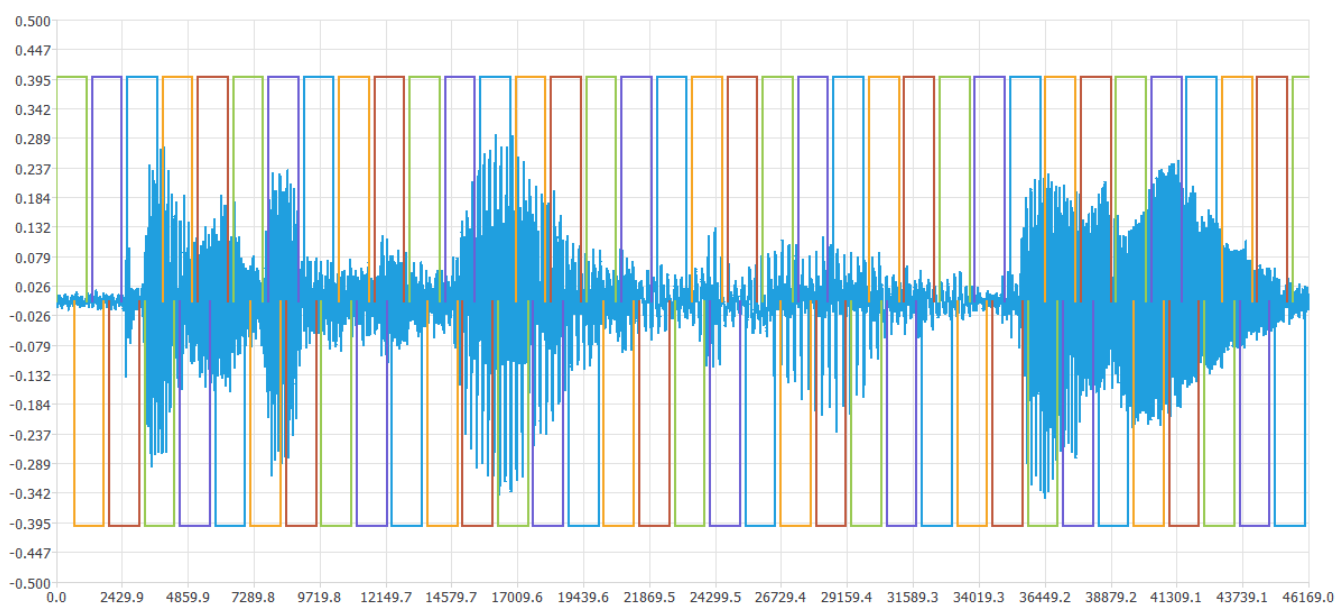
W powyższej funkcji, najpierw pobierana jest ilość próbek przypadających na jedną sekundę, oraz na 25 milisekundową ramkę. Następnie wartości kolejno z każdego obiektu typu QAudioBuffer, znajdującego się w wektorze audioBuffers, są dodawane do wektora wholeBuffer. Jest to wektor przechowujący zmienne zmiennoprzecinkowe, o podwójnej precyzji, tj.double.

4.4 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 powinno być 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.

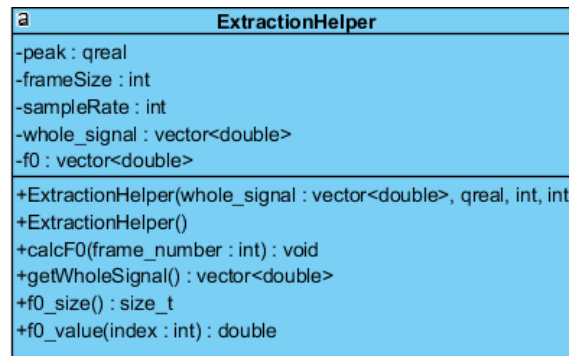
4.4.1 Ramkowanie oraz ekstrakcja wartości F0

Sygnał najczęściej dzielony jest na 20-50ms ramki. 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 (overlapping). Określona część każdej ramki, zawarta jest również w ramce kolejnej. Najczęściej jest to 20-50% segmentu.



Rysunek 11: Zobrazowany podział sygnału na ramki wraz zastosowaniem 30-procentowego overlappingu. 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.



Rysunek 12: Klasa stworzona w celu ekstrakcji F0, obliczenia energii sygnału oraz przechowywania tych wartości

Listing 2: Przedstawienie sposobu dokonywania podziału na ramki, wraz z zastosowaniem overlappingu

```

void ExtractionHelper::calcF0(int numberOfFrames)
{

    int numberOfShifts=10;

    Yin m_yin(frameSize , sampleRate);

    int frameStartIndexAfterShifting = 0;
    int shift= frameSize/numberOfShifts;

    while(frameStartIndexAfterShifting < (whole_signal.size()))
    {
        double *shift_frame =new double [frameSize];
        int index=0;
        frameStartIndexAfterShifting +=shift;
        for(int k=frameStartIndexAfterShifting;k<frameStartIndexAfterShifting+frameSize;k++)
        {
            if(k>=whole_signal.size())
                shift_frame[index] = 0;
            else
                shift_frame[index] = whole_signal.at(k);
            index++;
        }
    }
}

```

```

    }
    Yin::YinOutput f0_struct=m_yin.process(shift_frame);
    if (f0_struct.f0 <F0_MAX && f0_struct.f0 >F0_MIN)
        f0.emplace_back(f0_struct.f0);
    else
        f0.emplace_back(0);
    delete shift_frame;
}

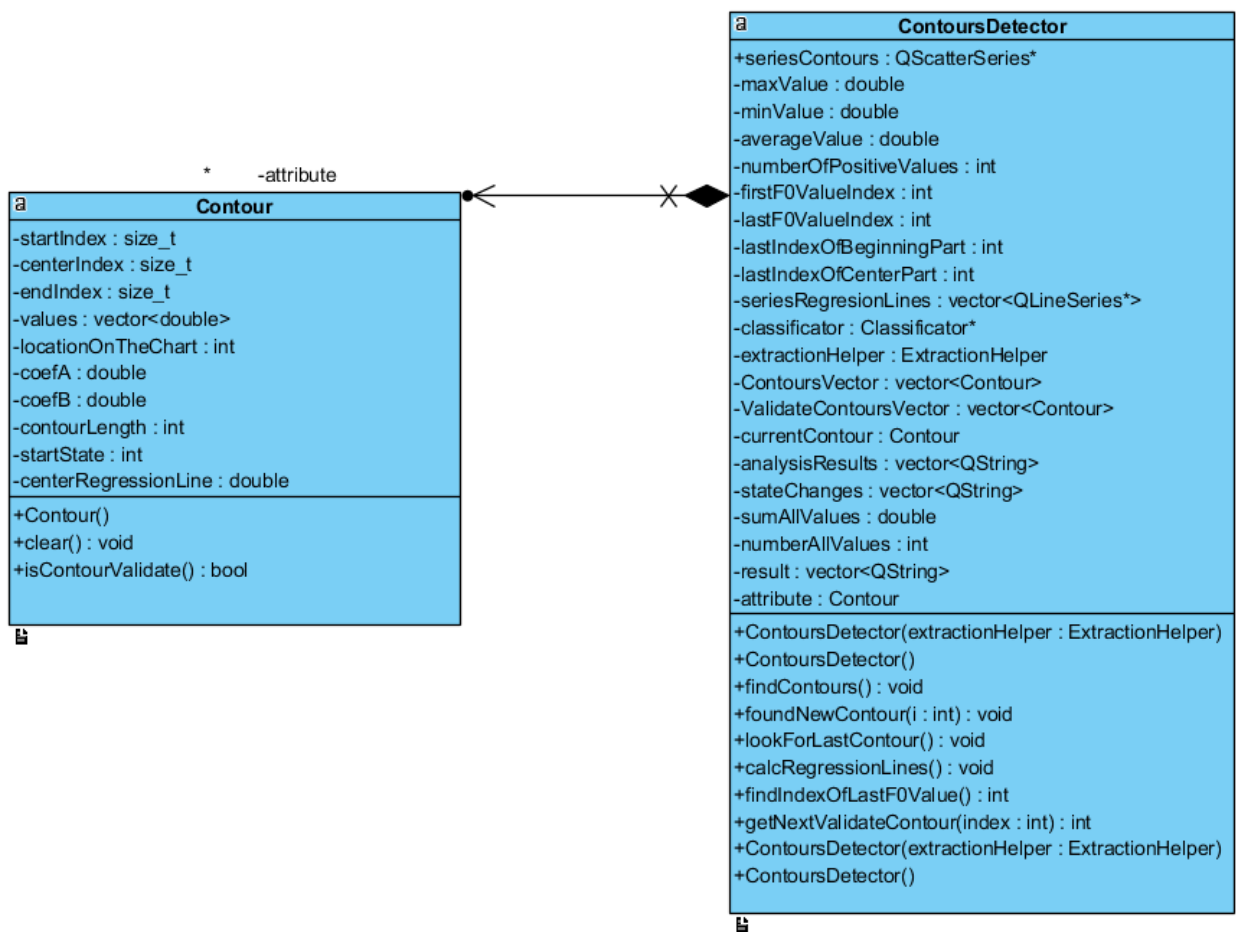
}

```

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 tym przypadku wartości te wynoszą kolejno 1102 i 44100. 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 jednakowy rozmiar. Po zakończeniu estymacji wartości F0 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.

4.5 Wykrywanie konturów

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



Rysunek 13: Klasy stworzone do wykrycia poszczególnych konturów 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 3: Początkowa faza funkcji wykrywającej kontury

```

#define TRANSITION 15

void ContoursDetector::findContours()
  
```

```

{
    currentContour.setStart(1);
    lastValueIndex = findIndexOfLastF0Value();
    for(size_t i=1;i<extractionHelper.f0_size();i++)
    {
        double value =extractionHelper.f0_value(i);
        double previousValue = extractionHelper.f0_value(i-1);
        seriesContours->append(i,value);
        if (value > maxValue) maxValue = value;
        if (value < minValue && value > F0_MIN) minValue = value;
        if(std::abs(value - previousValue) > TRANSITION)
        {
            currentContour.setEnd(i-1);
            currentContour.setCenter();
            foundNewContour();
            currentContour.setStart(i);
            currentContour.addValue(value);
        }
        else
        {
            currentContour.addValue(value);
        }
    }
}

```

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

4.5.1 Analiza wstępna wykrytego konturu

Listing 4: Funkcja zajmująca się analizą wstępną wykrytego konturu

```

void ContoursDetector::foundNewContour()

```

```

{
    if (!currentContour.isContourValidate())
    {
        currentContour.clear();
        return;
    }

    if (lastIndexOfFirstPart == 0)
    {
        firstValueIndex = currentContour.getStartIndex();
        double occurrenceRange = lastValueIndex - firstValueIndex;
        lastIndexOfFirstPart = currentContour.getStartIndex() + occurrenceRange;
        lastIndexOfCenterPart = lastValueIndex - occurrenceRange / 4;
    }
}

```

Najpierw kontur 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 konturami i nie powinny one być dodawane do wektora przechowującego wykryte kontury. Do określania czy dany obiekt jest przerwą między konturami, wystarczy sprawdzić jego pierwszą wartość. Metodą obserwacji zauważono, że kontury 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 5: Funkcja dokonująca walidacji konturu

```

bool isContourValidate()
{
    if (values.size() < 2) return false;
    if (values.at(0) == 0) return false;
    return true;
}

```

Późniejsza analiza konturów w celu wykrycia rodzaju danego zdania, oparta jest w dużej mierze na położeniu danego konturu w przestrzeni przebiegu całej intonacji. Przebieg intonacji zawiera wartości od pierwszego poprawnego konturu 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 konturom odpowiedniej lokalizacji, używane są zmienne typu całkowitego, `lastIndexOfFirstPart` oraz `lastIndexOfCenterPart`. Wyznaczają one końce początkowej oraz środkowej części.

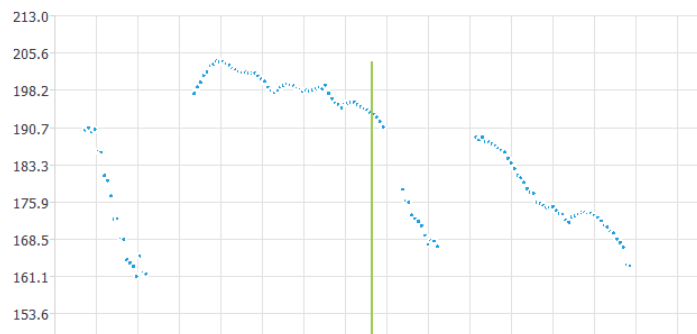
Listing 6: Dalsza część funkcji foundNewContour

```

if (ContoursVector.size()>0)
{
    if ((currentContour.getFirstValue()
        -ContoursVector.back().getLastValue())
        >(currentContour.getFirstValue()/6))
    {
        currentContour.setStartState(GROWTH);
    }
    else if ((ContoursVector.back().getLastValue()
        - currentContour.getFirstValue())
        >(ContoursVector.back().getLastValue()/4))
    {
        currentContour.setStartState(DROP);
    }
}
ContoursVector.push_back(currentContour);
currentContour.clear();
}

```

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.



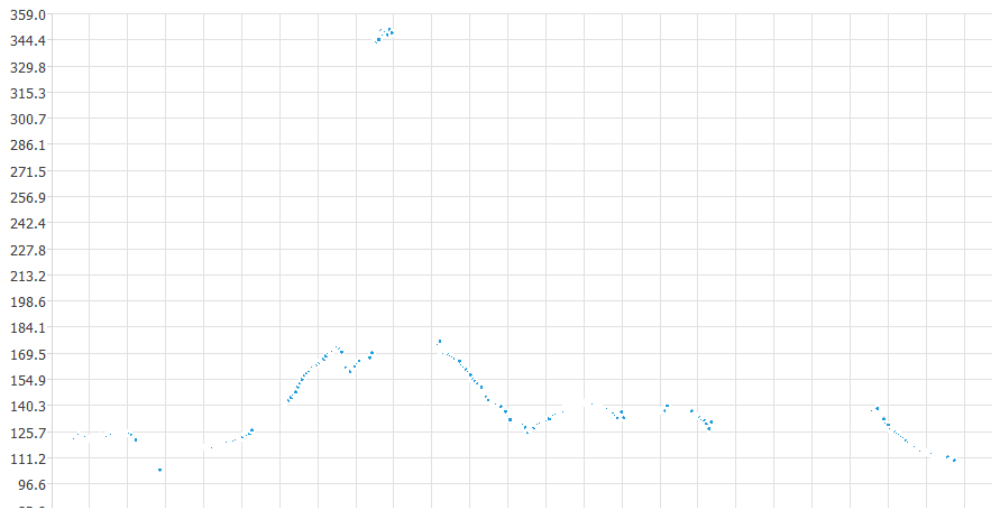
Rysunek 14: Przykładowy przeskok(wzrost) między pierwszym i drugim konturem, zlokalizowanymi w początkowej części

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

Listing 7: Dalsza część głównej funkcji findContours

```
double averageWithoutCurrentContour;
for(int i = 0; i < ContoursVector.size(); )
{
    averageWithoutCurrentContour = sumAllValues -
        ContoursVector.at(i).getCenterOfRegressionLine();
    averageWithoutCurrentContour /= (ContoursVector.size() - 1);
    if((ContoursVector.at(i).getCenterValue()
        > (averageWithoutCurrentContour * 1.6))
        && (ContoursVector.at(i).getContourLength() < 10))
    {
        ContoursVector.erase(ContoursVector.begin() + i);
    }
    else
    {
        setContourLocation(i);
        i++;
    }
}
calcRegressionLines();
}
```

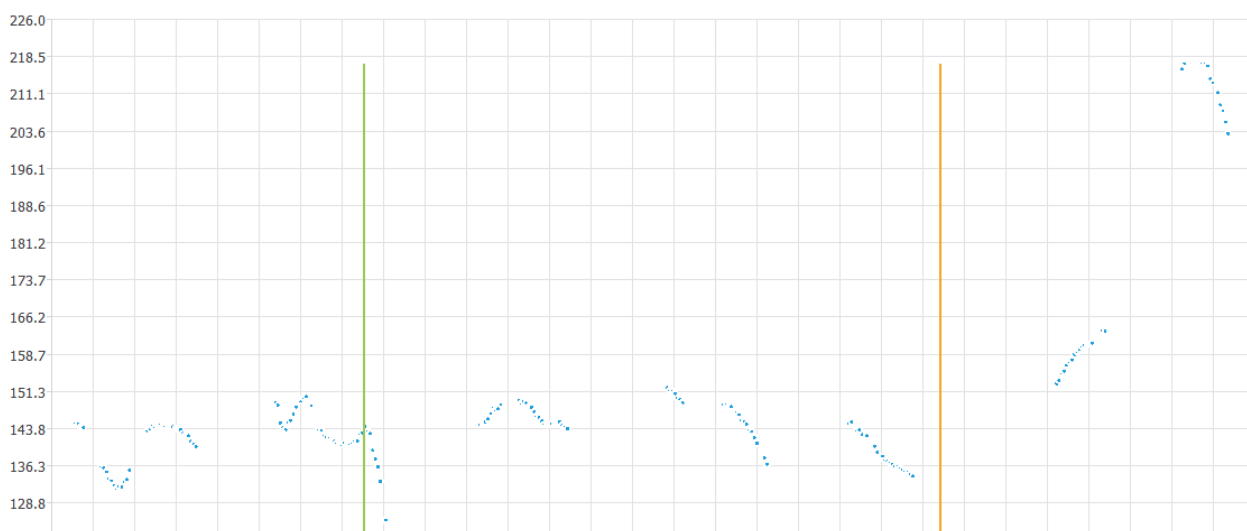
W czasie implementacji wykrywania konturów oraz przy późniejszej analizie, zauważano występowanie krótkich, wyraźnie odstających konturów. Pojawiały się w miejscach, w których nie było logicznego uzasadnienia ich występowania. Miały wyraźny wpływ na zaburzenia procesu wykrywania rodzaju zdania. Podjęto decyzję o usuwaniu ze zbioru takie kontury, 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 15: Przykład usuniętego konturu.

Na rysunku 14 przedstawiony został przykład usuniętego konturu. Jest to kontur, którego wartości oscylują około 345 jednostek. Jest to liczba ponad dwukrotnie większa od innych konturów, do tego kontur 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 konturu 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 konturu, zostaje mu przypisane odpowiednie makro, zawierające informację o lokalizacji konturu.

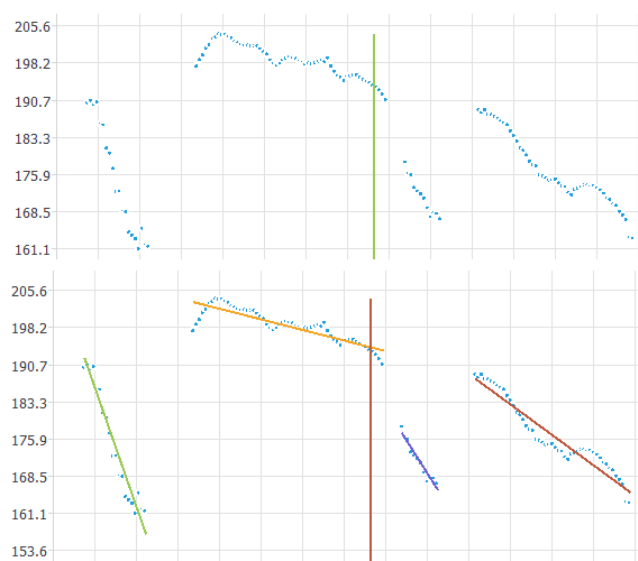
```
void ContoursDetector::setContourLocation(int i)
{
    if (ContoursVector.at(i).getCenter() < lastIndexOfFirstPart)
        ContoursVector.at(i).setLocation(BEGINNING);
    else if (ContoursVector.at(i).getCenter() < lastIndexOfCenterPart)
        ContoursVector.at(i).setLocation(CENTER);
    else
        ContoursVector.at(i).setLocation(END);
}
```



Rysunek 16: Przykład podziału przebiegu intonacji na 3 części

4.5.2 Współczynniki regresji liniowej

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



Rysunek 17: Fragment przebiegu intonacji przed i po nałożeniu linii regresji

5 Analiza wykrytych konturów