

UNIWERSYTET MARII CURIE-SKŁODOWSKIEJ

W LUBLINIE

Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki

Kierunek: **Informatyka**

Specjalność: **-**

**Oleksandr Mertsalov**

Nr albumu: 265513

**Oprogramowanie OCR w zastosowaniu praktycznym**

**Practical application of OCR methods**

Praca licencjacka  
napisana w Katedrze Oprogramowania Systemów Informatycznych

pod kierunkiem dr Marcina Denkowskiego

**Lublin, rok 2021**

# Spis treści

[Wstęp 5](#_Toc76377290)

[Rozdział 1. Optyczne rozpoznawanie znaków 6](#_Toc76377291)

[1.1 Przetwarzanie wstępne (ang. Pre-processing) 7](#_Toc76377292)

[1.2 Segmentacja tekstu (ang. Text segmentation) 8](#_Toc76377293)

[1.3 Rozpoznawanie znaków (ang. Character recognition) 9](#_Toc76377294)

[1.3.1 Rozpoznawanie wzorów (ang pattern recognition) 9](#_Toc76377295)

[1.3.2 Rozpoznawanie cech (ang. feature detection) 11](#_Toc76377296)

[1.4 Przetwarzanie końcowe (ang. Post-processing) 12](#_Toc76377297)

[1.5 Tesseract 12](#_Toc76377298)

[Rozdział 2. Sieci neuronowe w rozpoznawaniu znaków 14](#_Toc76377299)

[2.1 Wstęp 14](#_Toc76377300)

[2.2 Struktura sieci neuronowej 14](#_Toc76377301)

[2.3 Działanie sieci neuronowej 15](#_Toc76377302)

[2.4 Uczenie sieci neuronowej 18](#_Toc76377303)

[2.5 Długoterminowa pamięć krótkoterminowa (ang. Long short-term memory) 19](#_Toc76377304)

[Rozdział 3. Aplikacja do rozpoznawania tekstu na paragonie fiskalnym 19](#_Toc76377305)

[3.1 Opis aplikacji 19](#_Toc76377306)

[3.2 Proces uczenia Tesseract 20](#_Toc76377307)

[3.3 Implementacja aplikacji 27](#_Toc76377308)

[3.3.1 OpenCvService 28](#_Toc76377309)

[3.3.2 ReceiptReaderService 28](#_Toc76377310)

[3.3.3 HomeController 28](#_Toc76377311)

[3.4 Testy i rezultaty rozpoznawania 30](#_Toc76377312)

[3.4.1 Test silnika Tesseract 30](#_Toc76377313)

[3.4.2 Test aplikacji 30](#_Toc76377314)

[3.4.3 Paragony użyte do testów 30](#_Toc76377315)

[Podsumowanie 31](#_Toc76377316)

[Bibliografia 32](#_Toc76377317)

# Wstęp

Obecnie coraz więcej dokumentów przechowujemy w sposób elektroniczny. Od 2020 roku pojawiła się nawet możliwość załatwienia spraw urzędowych przez Internet i składanie wniosków bez wychodzenia z domu. Trzymanie dokumentów na komputerze ubezpiecza nas od możliwej straty informacji z powodu fizycznych szkód, a w przypadku ich dużej ilości, wielką zaletą jest szybkość podczas sortowania, filtracji i wyszukiwania danych. Dokumenty mogą zawierać określone dane: tekst lub obrazy. Przez tekst rozumiemy zbiór zdań, zdania są zbiorem słów, a słowo składa się z liter.

Wprowadzanie tekstu zawartego w dokumencie do komputera odbywa się za pomocą klawisz klawiatury, każda z których jest oznakowana pojedynczymi literami, cyframi lub symbolami interpunkcyjnymi. Komputer traktuje wciśniętą klawiszę jako unikalny kod binarny lub liczbowy, a następnie używa wybranego przez system pliku czcionki w celu wyświetlenia powiązanego z nim znaku na ekranie monitora. Stworzenie elektronicznej kopii dokumentu poprzez ręczne wpisywania każdego znaku jest dość czasochłonne w przypadku, gdy składa się on z więcej niż jednej strony, ale takie rozwiązanie powoduje, że w wyniku dostajemy stworzony edytowalny tekst.

Szybszym sposobem na przekazanie dokumentu komputerowi jest stworzenie jego wersji cyfrowej za pomocą skanera lub kamery. Taki dokument zostanie umieszczony w pamięci komputera jako plik graficzny zapisany w odpowiednim formacie, najczęściej którymi są: JPEG, PDF, PNG albo TIFF. Tego typu plik przedstawia obraz na ekranie za pomocą zawartej informacji o ilości pikseli oraz ich położenia i koloru. Z tego wynika, że taka wersja dokumentu elektronicznego służy tylko do podglądu jego treści.

Od lat 1950 ciągle się rozwija rozwiązanie, za pomocą którego w dzisiejszych czasach można uzyskać tekst z każdego pliku graficznego. Jest to oprogramowanie komputerowe, które się nazywa „OCR”. W swojej pracy przedstawię jego zastosowanie we własnej aplikacji. Celem mojego programu jest odczytywanie danych z najczęściej spotykanych wśród ludzi dokumentów. Jest to dokument potwierdzający sprzedaż – „Paragon Fiskalny”.

{ TODO: W trakcie : Omówienie zawartości pracy, kolejnych rozdziałów.}

# Optyczne rozpoznawanie znaków

Optyczne rozpoznawanie znaków (ang. Optical Character Recognition, OCR) to technologia, która automatycznie identyfikuje liczby, litery oraz znaki interpunkcyjne w plikach graficznych i konwertuje ich do postaci danych zrozumiałych komputerowi. Na wejściu podawany jest wcześniej przygotowany plik rastrowy, który poddaje się analizie w celu odnajdywania w nim zbioru pikseli, wizualizujących symbol, a następnie do każdego znalezionego przypisuje się kod binarny lub liczbowy z tablicy znaków. W wyniku zwracany jest edytowalny tekst. Przy użyciu skanera lub urządzenia wyposażonego w kamerę, rozpoznawanie tekstu może odbyć się w trakcie generowania pliku graficznego. W innym przypadku, możliwe jest przekazanie przygotowanej wcześniej grafiki, zawierającej tekst do systemu OCR.

Obecnie nie istnieje idealnego oprogramowania, które zawsze potrafi rozpoznawać tekst z dokładnością do 100%. Prawdopodobieństwo tego, że OCR odniesie sukces podczas pracy zależy w pierwszej kolejności od jakości materiału wejściowego. Im większa jest rozdzielczość obrazu i jego kontrastowość, tym większa szansa, że tekst zostanie poprawnie rozpoznany. Drugim ważnym czynnikiem jest samo oprogramowanie, składające się z po kolei wywoływanych algorytmów służących do poprawy obrazu, segmentacji tekstu, rozpoznania znaków i analizie wyniku. W dzisiejszych czasach można zaobserwować dużą ilość gotowych rozwiązań, które używają własne zaimplementowane sieci neuronowe za pomocą których dokładność rozpoznawania znaków tylko wzrasta. Taki program jest uniwersalny, ponieważ pojawia się możliwość dostosowania go do odpowiedniego problemu i nauczenia rozumieć pismo ręczne lub tekst o dowolnej czcionce.

W celu wyodrębnienia ciągu znakowego z obrazu używane są różne techniki. Każda technika składa się z procesów na wejście do których jest podawany wynik poprzedniego kroku, zaczynając od pliku graficznego i kończąc sformatowanym, edytowalnym tekstem (zob. Rysunek 1.1).

|  |
| --- |
| Diagram  Description automatically generated  Rysunek 1.1 Przebieg procesu OCR. Źródło: [1]. |

## Przetwarzanie wstępne (ang. Pre-processing)

Przekazany do OCR obraz, po procesie skanowania może zawierać pewną ilość szumów. Plamy, brud, zagięty lub pomarszczony papier, uszkodzona matryca urządzenia – są to czynniki powodujące pojawienie w pliku rastrowym niepotrzebnych pikseli, utrudniających pracę OCR. Za duży poziom jasności, słaba jakość lub kontrast spowodują zniszczenie kształtu znaków lub ich zamazanie. W tym celu przed procesem identyfikacji znaków stosują się do obrazu metody programowe, które służą do tego, aby ulepszyć jakości pliku rastrowego i usunąć wszystkie defekty.

Obraz jest zbiorem pikseli o różnych kolorach. Do rozgraniczenia tego, gdzie znajdują się w nim znaki, oprogramowanie OCR przyjmuje założenie, że są oni zawsze białego koloru, a wszystko pozostałe jest czarne. W fazie przetwarzania wstępnego, do zamiany kolorów na skalę szarości używany jest algorytm nazywany binaryzacja (z ang. binarization). Jego działanie wygląda następująco: przyjmuje się, że piksel białego koloru jest równy wartości 255, a czarny = 0. Następnie, odbywa się zaokrąglenie każdego pikselu według ustawionego progu (domyślne jest to połowa wartości 255, czyli 127). Jeśli wartość pikselu jest mniejsza od wartości progu, to taki piksel jest uznawany za czarny, w przeciwnym przypadku jego kolor zmieni się na biały.

## Segmentacja tekstu (ang. Text segmentation)

Zanim program zacznie rozpoznawać znaki, istotnie jest najpierw rozbić zlokalizowany na obrazie tekst na pojedyncze linie, a te na słowa oraz litery. Dla tego celu można użyć techniki histogramowej projekcji, która polega na wyliczaniu rzutów obrazu.

Najpierw wykonuje się segmentacja linii tekstu, aby podzielić obszar tekstowy na pojedyncze linie. Odbywa się to za pomocą metody do wyliczania rzutu poziomowego (ang. Horizontal Histogram Projection). Ta metoda przyjmuje na wejście obraz binarny otrzymany z poprzedniego kroku, w którym białe pikseli - są uznawane za ważną informację, a czarne - za tło. Następnie oblicza się suma białych pikseli w każdym wierszu obrazu. Wynikiem działania metody jest lista o długości równej wysokości obrazu. Jeśli wartość elementu listy jest duża pod względem pozostałych elementów, to znaczy, że jest to część linii tekstu. W przeciwnym wypadku, elementy o małej wartości mogą być uznane za obszary znajdujące się pomiędzy liniami tekstu i służyć jako wskaźniki na miejsca, gdzie należy podzielić obraz.

Kolejnym zadaniem jest segmentacja słów. Używa się do tego metoda wyliczania rzutu pionowego (ang. Vertical Histogram Projection) do której przekazywany jest wycięty w poprzednim kroku obraz, zawierający pojedynczą linię tekstu. Jej działanie jest podobne do metody wykonywanej podczas segmentacji linii tekstu, jedyną różnicą jest to, że tutaj oblicza się suma białych pikseli w każdej kolumnie obrazu a nie wierszu, jak to było wcześniej. Wynik przedstawia listę o długości równej szerokości obrazu, a jej elementy w zależności od posiadanej wartości mogą być częścią słów – jeśli są o dużej wartości lub polem pomiędzy nimi – w przypadku wartości niskich. Odstęp pomiędzy słowami jest większy niż odstęp pomiędzy znakami, dlatego ważne jest ustawienie progu jego szerokości, na podstawie którego będą wybierane kolumny, rozdzielające słowa.

Proces segmentacji znaków zależy od typu tekstu na obrazie. Jeśli znaki tworzące słowo są niezależne i nie łączą się pomiędzy sobą, to w takim wypadku używa się metoda z poprzedniego kroku segmentacji. W tym wypadku, wyliczanie pionowego rzutu odbywa się na podstawie obrazu, który zawiera pojedyncze słowo, składające się z ciągu znaków. Na wyjściu zwracana jest lista, z której należy wybrać kolumny o niskich wartościach, będące separatorami. W innym przypadku, jeżeli litery w tekście są połączone przez ligaturę, tak jak to często jest w piśmie ręcznym, to wtedy proces segmentacji słów jest wykonywany przy pomocy sztucznej inteligencji.

## Rozpoznawanie znaków (ang. Character recognition)

Jak tylko wszystkie potencjalne znaki znajdujące się na obrazu zostaną wyodrębnione, oprogramowanie OCR może użyć jednej z dwóch technik do ich identyfikacji.

### Rozpoznawanie wzorów (ang pattern recognition)

Rozpoznawanie wzorów polega na porównywaniu kształtów znajdujących się na obrazie z zestawem glifów w pamięci programu. Stosowanie tej techniki zaczęło się w latach 1960 do rozpoznawania dokumentów typu bankowych rachunków. Wtedy została stworzona czcionka o nazwie „OCR-A”, którą była używana podczas drukowania takich dokumentów. Zawierające w niej znaki można było łatwo rozróżnić, a ich szerokość była jednakowa. To spowodowało, że współczynnik rozpoznawania tekstu dla tych czasów oprogramowania wzrósł niemal do 100%, a jego praca nie zajmowała dużo czasu. Następnym krokiem było dodanie do systemów OCR kolejnych wzorów do rozpoznawania innych popularnych czcionek.

Ta technika jest również znana jako dopasowywanie macierzy (ang. Matrix Matching). Ta nazwa lepiej opisuje jej działanie, ponieważ obraz przetwarzany w tym kroku jest macierzą, gdzie czarne pikseli reprezentują wartość 1, a białe oznakowane jako 0 (zob. Rysunek 1.2).

|  |
| --- |
| Shape  Description automatically generated with low confidence  Rysunek 1.2. Binarna macierz litery A. *Źródło [2]* |

Rozpoznawanie zaczyna się od znalezienia centra macierzy. Następnie wylicza się promień, od jej centra do najbardziej oddalonej od niego jedynki na podstawie wzoru (1.1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

Na podstawie wyliczonej długości promienia, macierz dzieli się na 5 równych obszarów, a te z kolei są dzielone na 8 segmentów (zob. Rysunek 1.3). Końcowym wynikiem tego przetwarzania jest nowa macierz o wymiarach [8x5]. Jej wartości są wyliczane na podstawie ilości jedynek w każdym odcinku. Taki sam format mają szablony znajdujące się w pamięci programu.

|  |
| --- |
| agram  Description automatically generated  Rysunek 1.3. Dzielenie macierzy binarnej na obszary i segmenty. *Źródło: opracowanie własne.* |

Końcowym etapem jest porównywanie wyniku z obecnymi w programie szablonami. Znak oznacza się zidentyfikowanym wtedy, gdy parametry porównywalnych macierze są do siebie podobne.

### Rozpoznawanie cech (ang. feature detection)

Rozpoznawanie cech polega na klasyfikacji kształtów znajdujących się na obrazie, a następnie porównywaniu ich z zaimplementowanymi w programie określonymi cechami każdego ze znaków. Rozwiązanie to opiera się na geometrycznych i topologicznych właściwościach znaku, co pozwała na rozpoznawanie każdego typu tekstu, niezależnie od kroju pisma, jego rozmiaru i bez znaczenia czy jest on wytłuszczony czy pochylony. Podczas identyfikacji znaków biorą się pod uwagę taki właściwości jak np.:

* proporcje wysokości i szerokości znaku,
* ilość miejsc, gdzie linii przecinają się (X),
* ilość pętli (O),
* punkty rozgałęzienia (T),
* punkty przegięcia,
* kreski oraz ich kierunek,
* krzywe oraz ich położenie.

Na ten moment istnieje niezliczana ilość stosowanych czcionek i ta liczba ciągle się zwiększa, dodatkowo na wejście do systemu OCR często trafiają teksty napisane pismem ręcznym. Dla tego implementacja większości nowoczesnych programów OCR bazuje się na technice rozpoznawania cech.

## Przetwarzanie końcowe (ang. Post-processing)

Wynikiem pracy poprzedniego etapu jest rozpoznany tekst. Jednak niektóre znaki w nim mogą zostać niepoprawnie rozpoznane. Powodem temu jest to, że większość znaków są do siebie podobne, jak na przykład litera „O” czasami się myli z cyfrą „0” (zero) lub litera „i” może być rozpoznana jako litera „l” czy też jako cyfra „1” (jeden). Aby wyeliminować takie pomyłki, ten tekst poddaje się przetwarzaniu końcowemu, podczas którego program uwzględnia to, w jakim miejscu na obrazie muszą znajdować się cyfry, a gdzie słowa. Dodatkowo, w programie umieszczone są właściwe dla każdego języka - słowniki, według których sprawdzane jest czy rozpoznane słowo jest poprawne.

## Tesseract

Aby rozwiązać problem optycznego rozpoznawania znaków we własnej aplikacji, można użyć dowolnego z obecnie dostępnych na rynku oprogramowania OCR. Wybranie odpowiedniego produktu zależy w pierwszej kolejności od tego, czy można go dostosować do rozwiązywania konkretnego problemu. Jeżeli aplikacja ma umieć rozpoznawać tekst napisany pismem ręcznym w języku polskim, należy wybrać taki system, za pomocą którego można to zrobić. Innym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę jest kompatybilność z własną aplikacją. Dodatkowo warto wybrać taki produkt, który jest ciągle rozwijany i jest zrozumiały w użyciu.

Do rozwiązania problemu swojej pracy licencjackiej użyłem Tesseract. Jest to ciągle rozwijane oprogramowanie OCR udostępniane na licencji open source, stworzone w latach 1980 przez Hewlett-Packard, a od 2006 roku jest sponsorowane przez Google. Jego implementacja była napisana w języku C++, co pozwała na jego użycie jako API we wszystkich aplikacjach. Do pracy z oprogramowaniem można użyć wierz poleceń dostępna w takich systemach operacyjnych jak Windows, Linux, macOS i Android.

Pierwotnie Tesseract umiał rozpoznawać tylko język Angielski, a z czasem został rozbudowany o funkcjonalność do rozpoznawania takich języków jak francuski, niemiecki, włoski, hiszpański i holenderski. Obecna(oficjalna) wersja Tesseract (4.1.1) potrafi rozpoznać ponad 100 języków, w tym języki, w których teksty się piszą od prawej strony do lewej. Dodatkowo jest możliwość przetrenowania go, pod względem rozpoznawania innych języków, a także pisma ręcznego. Do pracy z obrazami i ich wstępnym przetwarzaniu, oprogramowanie używa zewnętrzną bibliotekę Leptonika, która po rozpoznawaniu znaków udostępnia takie formaty wyjściowe jak: zwykły tekst, hOCR (HTML for OCR), PDF i TSV.

Od wersji 4.0.0 Tesseract zawiera dodatkowy silnik do rozpoznawania tekstów, oparty o sieci neuronowe LSTM (ang. Long Short Term Memory OCR Engine). Dzięki temu, jego efektywność rozpoznawania zwiększyła się, a dodatkowo pojawiła się możliwość nauczyć Tesseract nowych języków. Silnik OCR używany w wersjach 3.0.0, też można użyć do rozpoznawania. On się nazywa silnikiem klasycznym (ang. Legacy OCR Engine) i działa na podstawie rozpoznawania wzorców.

# Sieci neuronowe w rozpoznawaniu znaków

## Wstęp

Działanie większości algorytmów polega na przetwarzaniu wejściowych danych i zwróceniu na wyjściu wyliczonego wyniku. Rezultat pracy algorytmu zależy od tego w jaki sposób programista zaimplementuje kod i jakie dane wejściowe zostaną nim uwzględnione. Każda możliwa wchodząca wartość do algorytmu jest uwarunkowana w kodzie, a w przypadku, gdy należy przewidzieć to, że tych wartości może być kilkaset lub więcej, to napisanie takiego kodu staję się bezsensownym, a nawet niemożliwym.

Sieci neuronowe – jest to typ algorytmów które wyliczają wyniki swojego działania na podstawie wszystkich swoich wcześniejszych rezultatów. Niestety takie rozwiązanie nie zawsze odnosi sukces, najczęściej prawdopodobieństwo tego, że algorytm zwróci odpowiedni do wejściowych danych wynik, wynosi około 95-100%. Współczynnik poprawności, zależy od tego na ile ta sieć została przetrenowana. W początkowych fazach uczenia, jej dokładność jest na bardzo niskim poziomie, aczkolwiek przy kolejnych iteracjach efektywność sieci neuronowej się zwiększa. Trenowanie jest procesem, podczas którego na wejście do algorytmu, pomimo badanych danych, przekazywany jest oczekiwany, poprawny wynik. W implementacji sieci neuronowej ustawione są losowe wartości używane w wymyślonej przez programistę, formuły matematycznej, na podstawie, której jest wyliczany wynik. Podczas trenowania, te wartości modyfikują się w zależności od tego, na ile się różni wynik sieci od oczekiwanego.

## Struktura sieci neuronowej

Jak wskazuje sama nazwa, sieć neuronowa jest zbiorem połączonych neuronów. Taki zbiór może zawierać od kilkuset do kilku tysięcy elementów tworzących sieć za pomocą powiązań zwanych wagami. Neuronem można nazwać obiekt przechowujący jakąś wartość, a wagą jest liczba niecałkowita, określająca powiązanie dwóch neuronów *[3]*. Elementy sieci neuronowej są zgrupowane i podzielone na warstwy z których ona się składa. Każdy neuron pierwszego warstwa, jest połączony z elementami drugiego, a te z kolei połączone z elementami trzeciego i tak do ostatniego warstwa. Ilość warstw może być różna, w zależności od implementacji, jednak ważnym jest zdefiniować ich przeznaczenie. Pierwsza warstwa każdej sieci neuronowej jest zdefiniowana jako wejściowa, wartości neuronów w niej, są ustawiane według tego, co zostało w danym kroku przekazano do sieci. Kolejne warstwa poza ostatniej, są warstwami ukrytymi i przeznaczone do rozwiązywania problemu. Wynik ich pracy, przedstawia się w postaci wartości elementów ostatniej warstwy (inaczej warstwy wyjściowej). Ogólne, sieć może składać się nawet z trzech warstw, jednak użycie takiej implementacji jest sensowne tylko podczas rozwiązywania nieskomplikowanych problemów *[4]*.

## Działanie sieci neuronowej

Ilość neuronów w każdej warstwie jest uzależniona od implementacji i od rozwiązywanego problemu. W przypadku rozpoznawania znaków, warstwa wejściowa będzie zawierała tyle samo elementów, ile znajduje się pikseli na obrazie przekazanym do sieci neuronowej. Warstwa wyjściowa wtedy będzie informowała, na ile obraz wejściowy jest podobny do każdego z możliwych znaków, a każdy neuron w niej, byłby odpowiednikiem konkretnego znaku *[5]*. Dla przykładu języka polskiego, alfabet, którego zawiera też znaki diakrytyczne (tj.: ą, ć, ę, ł, ń, ó, ś, ź, ż), warstwa ostatnia składałaby się z 114 elementów (zob. Rysunek 2.1).

|  |
| --- |
| Rysunek 2.1.Przykładowy model sieci neuronowej. *Źródło: opracowanie własne.* |

W przypadku przekazanych pikseli do pierwszego warstwa, neurony mogą reprezentować ich poziom szarości. Białe pikseli będące tłem w postaci wartości 0, czarne jako 1, a wartości pomiędzy nimi są pikseli szare. Można wtedy określić, że wszystkie wartości bliskoznaczne zera nie istotne, ponieważ nie są częścią znaku. W neuronie, jest to ustalane za pomocą bloku aktywacji. Występujące wartości w neuronie mogą być niepraktyczne dla wyliczania wyniku, dlatego blok aktywacji, normalizuje ich, aby oni znajdowali się w jakimś wyznaczonym zakresie. Stosuje się do tego funkcja aktywacji, którą może być jedna z poniższych:

* funkcja sigmoidalna,
* tangens hiperboliczny,
* sinusoida i cosinusoida,
* funkcja liniowa,
* funkcja Gaussa.

Dobór odpowiedniej funkcji, zależy od tego jaki problem rozwiązuje sieć neuronów. Często stosuje się funkcja sigmoid *[6]*. Jej wynikiem jest wartość w przedziale od 0 do 1, która jest wyliczana według wzoru (2.1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1) |

Neuron aktywuje się w przypadku, gdy wartość jest większa od zera. Na podstawie tego, wszystkie sygnały wejściowe, reprezentujące pikseli białe, zostaną zignorowane w procesie rozpoznawania znaku.

Czasami, do rozwiązania stawianego przed siecią problemu, niezbędne jest, aby aktywacja neuronu odbywała się po przekroczeniu innej wartości niż zero. Próg aktywacji można przesunąć, uwzględniając w funkcji ‘bias’. Ten składnik jest dodawany do wartości przekazanej do funkcji, tym samym przesuwając próg wzdłuż osi X. Ujemny bias, spowoduje przesunięcie w prawo, a dodatni w lewo (zob. Rysunek 2.2).

|  |
| --- |
| Diagram  Description automatically generated  Rysunek 2.2. Przesunięcie progu aktywacji funkcji sigmoid, wędług bias. *Źródło [7]* |

W warstwach ukrytych i warstwie wyjściowej, wartość neuronu jest wyliczana na podstawie sygnałów z warstwy poprzedzającej. Siła sygnałów jest wyrażona wagami, przez które odbywa się połączenie neuronów. Wagi zerowe oznaczają, że powiązania pomiędzy elementami nie ma. Sygnały wejściowe neuronu, są sumowane uwzględniając wartości wag, przez które oni są mnożone. Odbywa się to w bloku sumarycznym, który z kolei przekazuje wyliczoną wartość do bloku aktywacji, a ten przekazuję przetworzony sygnał do neuronów kolejnego warstwa (zob. Rysunek 2.3) *[8]*.

|  |
| --- |
| Diagram  Description automatically generated  Rysunek 2.3 Model neuronu warstwy ukrytej. *Źródło [9]* |

Uwzględniając ‘bias’ jako wejście do neuronu oraz jego wagę o wartości jeden, wyliczanie sygnału wyjściowego ‘*y’* można opisać wzorem (2.2):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

gdzie *f* jest funkcją aktywacji, *<u0, u1... un>,* są wejścia do neuronu, a <*W1,W0… Wn>,* to wagi.

## Uczenie sieci neuronowej

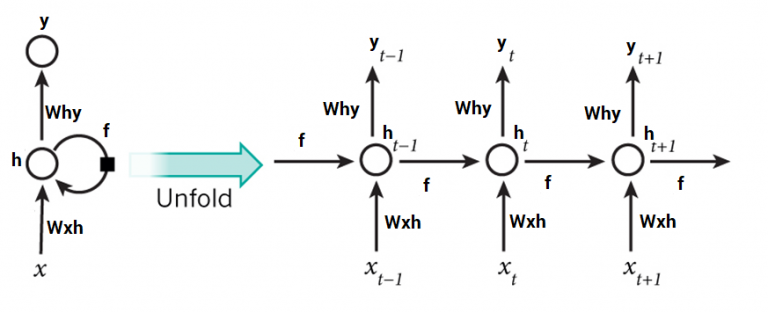
Rezultatem działania sieci neuronowej, jest aktywność elementów warstwy ostatniej. Na stopień aktywności neuronów wpływają wagi, przekazujące sygnały z warstwy poprzedzającej. Na etapie implementacji sieci neuronowej, wartości wag są ustawiane losowo. To powoduje, że podczas jej działania, w neuronach błędnie się wylicza poziom ich aktywności. Proces podbierania odpowiednich wag dla sieci neuronowej, przy których jej wartości wynikowe są przybliżone do oczekiwanych, nazywany jest uczeniem z nauczycielem. W tej metodzie uczenia do sieci przekazują się dwa zbiory: sygnały wejściowe i oczekiwane sygnały wyjściowe. Na podstawie wyliczonych i oczekiwanych wartości warstwy ostatniej, liczona jest różnica pomiędzy nimi. Zadaniem algorytmu uczenia, jest uregulowanie wag tak, aby ta różnica była jak najmniejsza. Przykładem takiego algorytmu uczenia, jest *algorytm wstecznej propagacji błędów* (ang. BackPropagation), należący do gradientowych metod optymalizacji. *[6]*

Do celów uczenia stosują się różne metody, wybór których zależy od rozwiązywanego problemu. Pomimo uczenia z nauczycielem, istnieją też wiele algorytmów uczenia bez nauczyciela (lub uczenie samoorganizujące), podczas których sieć sama wypracowuje funkcję przetwarzania sygnałów *[6].*

## Długoterminowa pamięć krótkoterminowa (ang. Long short-term memory)

W trakcie rozpoznawania tekstu, znaki w nim mogą być połączone ligaturami. To może spowodować, że na etapie segmentacji, słowo zostanie podzielone nie na pojedyncze symbole, a na losowe części (kawałki znaków). Użycie zwyklej sieci neuronowej nie rozwiąże tego problemu, ponieważ aby zidentyfikować znak należałoby na wejście sieci, naraz przekazać kilka obrazów, które ten znak reprezentują. Pomocnicze w takim przypadku będą sieci rekurencyjne.

Sieci rekurencyjne lub RNN (ang. Recurrent Neural Network) stosują się do rozwiazywania problemów, w których należy wziąć pod uwagę sekwencję danych wejściowych, a nie jeden konkretny przypadek. Elementem wyróżniającym taką strukturę, jest duża ilość sprzężeń zwrotnych, które mogą łączyć wyjście neuronu z wejściem do innych warstw poprzedzających lub tego samego *[10]*. Każdy element, będący wektorem w sekwencji danych wejściowych, jest przekazywany do sieci w okresie czasowym ‘*t’*, którego wartość maksymalna, jest równa ilości elementów w zbiorze wejściowym. Z tego wynika, że wektor ‘*x’* określający obecne wejście, można oznakować jako ‘’. Natomiast wektor ‘’, opisywałby poprzedni element ze zbioru wejściowego, a ‘’ - następny. W procesie działania RNN, wektory są przekazywane do warstwy ukrytej, uwzględniając przy tym wartości wag i wektory będące wynikiem poprzedniego kroku ‘’. Rezultat pracy każdego kroku ‘*h’*, jest przekazywany na wyjście ‘*y’* i jednocześnie na wejście następnego kroku ‘’. Opisane działanie sieci RNN jest zwizualizowano na Rysunku 2.4.



Rysunek 2.4. Rozwinięta rekurencyjna sieć neuronowa. *Źródło [11]*

Uczenie rekurencyjnej sieci neuronowej, tak samo jak i w zwykłych sieciach, wykonywane jest przy pomocy algorytmów wstecznej propagacji. Ich zadaniem jest zmodyfikowanie wartości wag każdego kroku tak, aby różnica błędu była jak najmniejsza. W trakcie aktualizacji wag, może powstać problem zanikającego gradientu (ang. Vanishing Gradient). Jest to problem najczęściej pojawiający w sytuacjach dużej ilość elementów zbioru wejściowych. Podczas wyliczania nowych wartości wag, uwzględniane są wyniki kroków następnych, co w rezultacie powoduje to, że wagi łączące pierwsze wektory, zbioru wejściowego, podlegają minimalnym zmianom. Zadaniem uczenia, jest znalezienie każdemu wektorowi takich minimalnych wartości, przy których sieć neuronowa lepiej rozwiązuje postawiony problem. Jeżeli postępy w odnajdywaniu minimum dla wagi są nieznaczne, to czas nauczenia takiej sieci może się wydłużyć do nieskończoności. Rozwiązanie tego problemu, leży w architekturze ulepszonego modelu RNN, którym jest sieć LSTM.

W sieciach LSTM ważność przekazywanych danych jest kontrolowana. Jeżeli okaże się, że jakieś dane z poprzednich kroków są nie istotne podczas rozwiązywania postanowionego problemu, to sieć LSTM te dane zapomni, natomiast ważną informację, z wektorów wejściowych, sieć zapisze w pamięci. Zwykła siec rekurencyjna też zawiera pamięć, są to dane przekazywane pomiędzy krokami. Przy dużym zbiorze danych wejściowych, rezultat działania pierwszych kroków zanika, co oznacza, że pamięć ta jest krótkoterminowa *[12]*. Sieć LSTM, jak brzmi sama nazwa, zawiera dodatkowo pamięć długoterminową, którą zarządza przepływem danych. Dodanie takiej pamięci wymaga uwzględnienia w architekturze sieci trzech warstw (zob. Rysunek 2.5).

|  |
| --- |
| A picture containing text, clock  Description automatically generated  Rysunek 2.5. Budowa architektury LSTM. *Źródło [13]* |

W pierwszej kolejności, przed przekazywaniem danych do każdej z warstw, odbywa się konkatenacja wektora wejściowego wraz z wektorem wyjściowym poprzedniego kroku. Otrzymany wynik jest mnożony przez wagi obydwóch wektorów i przekazywany na wejście do każdej warstwy. Pamięcią długoterminową też jest wektor, który jest przekazywany w każdym kroku czasowym.

Warstwa bramki zapomnienia (ang. Forget gate layer) decyduje o tym, jakie dane należy wymazać z pamięci długoterminowej. Przekazane do tej warstwy wejście, trafi do funkcji sigmoid, która zwraca wektor z wartościami w przedziale [0,1]. Wartości bliskoznaczne zera są elementami które należy usunąć z pamięci. W tym celu otrzymany wektor, jest mnożony przez wektor stanu pamięci *[14]*.

Warstwa bramki wejściowej (ang. Input gate layer) decyduje o tym, jakie dane wejściowe należy dodać do pamięci długoterminowej. W pierwszej kolejności przy pomocy funkcji sigmoid, wybierane są elementy, które zostaną zaktualizowane. Funkcja sigmoid jest używana, aby określić jak dużo informacji każdego elementu wektora wejściowego musi przejść. W przypadku jedynki, to znaczy, że wartość elementu, zostanie w całości przekazana do pamięci, a jeżeli zero, to nic. Do określenia przekazywanej wartości, używa się funkcja aktywacji ‘tangens hiperboliczny’. Następnie, obydwa wektory są mnożone przez siebie, co w rezultacie daje wektor zawierający nową informację. W kolejnym kroku stan pamięci długoterminowej uzupełnia się nowym wektorem *[13]*.

Warstwa bramki wyjścia (ang. Output gate layer) - jest końcowym etapem przepływu danych, w którym uwzględnia się praca dwóch poprzednich warstw. Nowy stan pamięci długoterminowej jest używany w celu, aby wyliczyć wynik na podstawie wektora, przekazanego w danym kroku czasowym. Wektor pamięci może zawierać elementy różnych wartości. Dlatego jest on przekazywany do funkcji tangens hiperboliczny, która scali te wartości, w przedziale [-1, +1]. Następnie należy zdefiniować, jakie dane z pamięci, są niezbędne do rozwiązania problemu tego kroku. W tym celu, dane wejściowe tej warstwy, są przekazywane do funkcji sigmoid, a następnie są mnożone przez stworzony na podstawie pamięci wektor. Wynik jest przekazywany na wyjście oraz do następnego kroku *[11]*.

Pamięć długoterminowa jest przekazywana pomiędzy krokami. W każdym z nich, jest aktualizowana na podstawie wektora wejściowego, przekazywanego w tym kroku.

# Aplikacja do rozpoznawania tekstu na paragonie fiskalnym

## Opis aplikacji

Dane znajdujące się na paragonach fiskalnych mogą być bardzo pomocnicze, ponieważ zawierają dużo informacji, za pomocą której można ułatwić robienie zakupów, planować własne finanse oraz regulować ilość kupowanych artykułów w markecie. Paragony fiskalne zawierają informację o czasie zakupu, o sklepie i o tym, jakie można kupić w nim artykuły oraz za jaką cenę. Na podstawie tych danych, można porównać cenę na konkretny produkt w dwóch różnych sklepach lub odległość do każdego z nich. Można też zrobić statystykę tego, jak często robią się zakupy i ile pieniędzy na to idzie. Istnieje duża ilość użytecznych zastosowań dla tego typu danych i pozostaje tylko rozwiązać problem tego, jak ich można uzyskać z papierowego dokumentu.

W swoim rozwiązaniu tego problemu zakładam potrzebę przeniesienia danych, znajdujących się na paragonie do systemu komputerowego za pomocą kamery lub skanera, a następnie przetworzenia ich do postaci tekstowej za pomocą oprogramowania OCR. Podczas druku dokumentu, urządzenie fiskalne używa unikalną czcionkę stworzoną do tego celu. Żeby dobrze rozpoznać tekst, system OCR musi być zapoznany z tym, jakie kształty znaków mogą się pojawić na obrazie. W tym celu należy przeprowadzić proces nazywany “uczeniem” i przekazać do systemu OCR nową czcionkę - jako zbiór uczący. Konieczne jest zachowanie rozpoznanych danych, aby w przyszłości pojawiła się możliwość ich użyć. Dobrym miejscem na przechowywanie informacji znajdującej się na paragonach fiskalnych, jest baza danych SQL, schemat której należy wymyślić i zaimplementować.

## Proces uczenia Tesseract

Oprogramowanie Tesseract do rozpoznawania tekstu używa wcześniej przygotowany plik o rozszerzeniu “trainneddata”. Tego typu pliki są stworzone dla większości mownych języków i są dostępne na oficjalnej stronie. Każdy z nich jest wyróżniony nazwą w postaci skrótu jeżyka, tak na przykład plik o nazwie “pol.trainneddata” jest przeznaczony do rozpoznawania tekstów polskich. Od wersji 4.00 te pliki zawierają w sobie model przetrenowanej sieci neuronowej LSTM za pomocą, której odbywa się rozpoznawanie. Oprogramowanie ma funkcjonalność, na podstawie którego, pobraną model LSTM można douczyć nowymi danymi. Według oficjalnej instrukcji dotyczącej uczenia Tesseract, proces ten najlepiej przeprowadzać na maszynach z zainstalowanym systemem typu Linux. Dla szybszej pracy, zaleca się mieć procesor wielordzeniowy.

Zacząć uczenie należy od przygotowania danych, na podstawie których będzie odbywał się ten proces. W tym celu należy przekazać plik czcionki używanej do druku paragonów na wejście do skrypty pobranego z oficjalnej strony, na podstawie którego wygeneruje się gotowy zestaw danych do uczenia. W sytuacji z paragonami ciężko znaleźć niezbędny plik czcionki, ale funkcjonalność Tesseract udostępnia możliwość samemu wygenerować zestaw uczący na podstawie zwykłego obrazu z tekstem. Kolejnym problemem jest to, że czcionka może się różnić w zależności od sklepu i oprogramowania zainstalowanego na urządzeniu fiskalnym. W swojej pracy licencjackiej przygotuję rozwiązanie tylko dla jednego sklepu, ponieważ uwzględnienie innych wymaga dużej ilości danych do uczenia, których w tej chwili nie jestem w stanie zebrać. Wybrałem do tego celu hipermarket Auchan, z tego względu, że oferuje dużą ilość artykułów do sprzedania i dzięki temu kształty znaków można spotkać na paragonie, połączone w różnych kombinacjach. Przygotowane przeze mnie dane są uzyskane za pomocą skanera. Są to obrazy paragonów ze sklepu Auchan w postacie plików o rozszerzeniu „png”. Podczas skanowania, za pomocą właściwego oprogramowania, wyodrębniłem miejsca, gdzie znajdowali się dokumenty na szybie urządzenia, aby w wyniku otrzymać tylko same obrazy paragonów bez tła. Przykładowy obraz paragonu można zobaczyć na Rysunku 3.1.

|  |
| --- |
| Rysunek 3.1. Zeskanowany paragon. |

Jak to jest w sytuacji z rozpoznawaniem, tak i dla procesu uczenia, obraz należy wstępnie przetworzyć, aby poprawić jego jakość. Oprogramowanie Tesseract, przed działaniem silnika OCR, wykonuje różnego typu operacje w tym celu. W oficjalnych źródłach podkreśla się, to jak dobrze on to robi, jednak zaleca się, aby przekazywany obraz był od razu dobrze przetworzony. Stworzone przeze mnie algorytmy poprawiające obraz, będą opisane w dalszej części rozdziału, ponieważ są używane też podczas działania aplikacji. Dla lepszego rezultatu rozpoznawania, jest zalecane użycie tych samych metod przetwarzania obrazu co i podczas uczenia. Z racji tego, że w użytej wersji Tesseract proces OCR odbywa się na podstawie rozpoznawania linii tekstu, postanowiłem zaimplementować własny algorytm, który dzieli paragon na pojedyncze obrazy każdego wiersza. Jest on też częścią zaimplementowanej aplikacji i zostanie opisany w późniejszej części pracy. Dla procesu uczenia, zapisałem wycięte linii w formacie „png” i nazwałem liczbami w zależności od ich kolejności. Następnie, za pomocą programu „jTessBoxEditor” scaliłem te obrazy w jeden plik formatu tiff. Aby to zrobić, należy w panelu głównym programu, w zakładce “Tools”, wybrać opcję “Merge TIFF”. W otwartym oknie należy zaznaczyć wszystkie wycięte grafiki i nacisnąć przycisk “Open”. Na kolejnym ekranie pojawi się możliwość wybrania miejsca i nazwy generowanego pliku. Według konwencji Tesseract plik ten musi być nazwany zgodnie z wzorcem (2.1).

|  |  |
| --- | --- |
| *[skrót języka].[nazwa czcionki].exp[numer pliku].[rozszerzenie plika]* | (2.1) |

Zbiór przygotowanych przeze mnie danych był zebrany na podstawie 11 paragonów, wydrukowanych hipermarketem Auchan. Podsumowując liczbę stron w każdym z nich wynika, że do trenowania zostanie przekazano 349 linii tekstu w postaci obrazów. Poniżej są wymienione nazwy tych plików:

|  |  |
| --- | --- |
| * pol.auchan.exp0.tiff, * pol.auchan.exp1.tiff, * pol.auchan.exp2.tiff, * pol.auchan.exp3.tiff, * pol.auchan.exp4.tiff, * pol.auchan.exp5.tiff, | * pol.auchan.exp6.tiff, * pol.auchan.exp7.tiff, * pol.auchan.exp8.tiff, * pol.auchan.exp9.tiff, * pol.auchan.exp10.tiff. |

Dodatkowo w celu uczenia, niezbędnie jest przekazanie do sieci LSTM oczekiwany rezultat. Tesseract ma wbudowaną funkcjonalność, przy pomocy której dla wybranego obrazu, można wygenerować plik z informacją o znakach występujących na nim. W tym celu należy wywołać program tesseract, przekazując jako parametr operację lstmbox. Na Listingu 3.1, jest zamieszczone cale polecenie.

**tesseract -l pol --dpi 300 --oem 1 --psm 7 pol.auchan.exp4.tif pol.auchan.exp4 lstmbox**

Listing 3.1. Wywołanie operacji lstmbox

Do programu zostały przekazane takie parametry:

* l – wybór języka (ang. language), który należy rozpoznać. W tym przypadku jest to język polski,
* dpi – podanie rozdzielczości przekazywanego obrazu. Wartość DPI (ang. dots per inch), jest przekazywana, aby Tesseract zdefiniował rozmiar liter. Zeskanowane przeze mnie obrazy posiadają wartość 300,
* oem – wybór silnika OCR którego należy użyć do rozpoznawania. Wartość jeden określa silnik oparty o sieci neuronowe LSTM,
* psm – wybór typu segmentacji obrazu. Wybrana wartość powoduje to, że obraz będzie traktowany jako jeden wiersz tekstu,
* pol.auchan.exp4.tif – ścieżka do obrazu, na podstawie którego wygeneruje się informacja,
* pol.auchan.exp4 – nazwa wyjściowego pliku. Musi być taka sama jak i nazwa obrazu,
* lstmbox – operacja użycie której wygeneruje plik z informacją o znakach na obrazie.

Wywołanie powyższego polecenia spowoduje, to że Tesseract spróbuje zlokalizować i rozpoznać znaki znajdujące się na pliku wejściowym, a następnie odnotuje te dane w pliku tekstowym. Każdy znak wraz z koordynatami linii tekstu i numerem strony jest zapisywany w kolejnej linii pliku, według wzorca (2.2).

|  |  |
| --- | --- |
| *[znak] [punkt X] [punkt Y]* *[szerokość linii] [wysokość linii] [numer strony]* | (2.2) |

Punkty X i Y są podawane według miejsca, w którym zaczyna się powiązana linia tekstu.

Z racji tego, że sieć jeszcze nie umie dobrze rozpoznawać daną czcionkę, wygenerowany plik może zawierać błędy, które należy poprawić. Wspomniany wcześniej program „jTessBoxEditor”, był stworzony do tego celu, aby umożliwić poprawianie koordynat za pośrednictwem graficznego interfejsu użytkownika (zob. Rysunek 3.2). Sprawdzić należy każdy znak, byleby sieć neuronowa nie została nauczona fałszywymi danymi.

|  |
| --- |
| Rysunek 3.2. Rzut ekranu aplikacji JTessBoxEditor. |

Ostatnim krokiem przygotowywania danych jest połączenie plików graficznych wraz z ich tekstowymi odpowiednikami. Ta kombinacja musi być przekazana jako zbiór uczący do Tesseract w postaci pliku o rozszerzeniu lstmf. Żeby wygenerować taki plik, przekazałem do programu tesseract podobne parametry jak w Listingu 3.1. Jedyną różnicą jest wywoływana operacja, którą w tym wypadku jest lstm.train:

**tesseract -l pol --dpi 300 --oem 1 --psm 7 pol.auchan.exp4.tif pol.auchan.exp4 lstm.train**

Trenowanie Tesseract odbywa się za pośrednictwem programu lstmtraining. Jest to wielofunkcyjne narzędzie, za pomocą którego można używać różne metody uczenia. Tworzony przeze mnie program jest przeznaczony do rozpoznawania języka polskiego. W tym celu potrzebuję plik pol.traineddata z modelem sieci LSTM przetrenowanym na tekstach polskich. Pobrałem go z oficjalnych źródeł Tesseract. W przypadku, gdyby model umieszczony w tym nie umiał rozpoznawać jakiegoś symbolu tekstowego lub jak w przypadku rozwiązywanego przeze mnie problemu, nie radziłby z nową czcionką, to wtedy należy zastosować podejście nazywane „Fine Tuning”. Jest to proces douczania nowymi danymi już istniejącą siec, nie zmieniając jej struktury. Aby poprawić rozpoznawalność pobranego modelu wywołałem polecenie zamieszczone na Listingu 3.2.

Używane w nim parametry są opisane poniżej:

**1 lstmtraining**

**2 --model\_output checks/auchan**

**3 --continue\_from polModel.lstm**

**4 --traineddata pol.traineddata**

**5 --train\_listfile training\_files.txt**

Listing 3.2. Polecenie używane do trenowania Tesseract.

* model\_output – miejsce, do którego będzie zapisywany stan sieci podczas trenowania. Jako wartość podałem ścieżkę do stworzonego folderu o nazwie “checks” oraz nazwę modeli “auchan”,
* continue\_from – model sieci lstm. Należy ją wyeksportować z pobranego wcześniej pliku pol.traineddata. Zrobiłem to przy pomocy kolejnego programu udostępnionego oprogramowaniem Tesseract, o nazwie “combine\_tessdata”. Program ten pozwala na różne działania związane z danymi zawartymi w pliku trainneddata. W celu eksportu, przekazałem do niego parametr “-e”, ścieżkę do pliku i żądany element, którym jest model sieci o rozszerzeniu “lstm”:

**combine\_tessdata** **-e** **pol.traineddata** **pol.lstm**

* traineddata – jest to wcześniej pobrany plik, zawierający model sieci lstm, listę liter i listę liczb, które rozpozna Tesseract, słownik słów oraz inne niezbędne do rozpoznawania dane,
* train\_listfile – plik, zawierający listę przygotowanych do uczenia plików, o rozszerzeniu “lstmf”.

Podczas uczenia, Tesseract zapisuje stan przetrenowanej sieci w postaci plików które w nazwie zawierają napis „checkpoint”. Są dwa typy takich plików:

1. *<nazwa\_modeli>\_checkpoint* – końcowy stan modeli sieci neuronowej,
2. *<nazwa\_modeli><znakowy\_współczynnik\_błędu>\_<iteracja>. checkpoint* – jest zapisywany każdorazowy, gdy wynik uczenia się ulepsza.

Każdy z nich można przetworzyć do postaci pliku traineddata, używanego podczas rozpoznawania, za pomocą polecenia na Listingu 3.3.

Listing 3.3. Generowanie pliku traineddata

**1 lstmtraining**

**2 --stop\_training**

**3 --continue\_from checks/auchan\_checkpoint**

**4 --traineddata pol.traineddata**

**5 --model\_output auchan.traineddata**

Przekazywanymi parametrami są:

* stop\_training – oznacza to, że siec została wystarczająco nauczona i program musi wygenerować plik końcowy,
* continue\_from – stan sieci na podstawie którego, wygeneruje się plik końcowy. Przekazałem tu końcowy stan modeli w postaci pliku “auchan\_checkpoint”,
* traineddata – plik “pol.traineddata”, używany w procesie uczenia,
* model\_output – nazwa i ścieżka do pliku, który należy wygenerować. Z tego względu, że model ten jest przeznaczony do rozpoznawania czcionki używanej w sklepie Auchan, to podałem nazwę “auchan.traineddata”.

## Implementacja aplikacji

Program do rozpoznawania paragonów jest aplikacją webową. Implementacja została napisana w języku Java w wersji 12, edycji ‘Enterprise edition’. W projekcie został użyty szkielet (ang. framework) do budowy aplikacji webowych Spring MVC. Szkielet używa wzorca projektowego ‘Model Widok Kontroler’ (ang. Model View Controller), w którym:

* widok, jest stroną przekazywaną do klienta,
* model, to obiekt, dane którego zostaną zaprezentowane w widoku,
* kontroler, kontroluje jaki model, w którym widoku pokazać.

Do użycia Tesseract, do projektu została dodana biblioteka Tess4j. Jest to opakowanie (ang. wrapper) JNA (Java Native Access), dzięki któremu można wywoływać oryginalne API Tesseract, używając kodu Java *[15]*. Do przetwarzania obrazów używa się biblioteka OpenCV. Wynik działania aplikacji, jest zapisywany do bazy danych MySql. Aplikacja działa na porcie 8080.

### OpenCvService

Implementacja klasy OpenCvService zawiera metody służące do przetwarzania obrazów. Wszystkie przetwarzania są wykonywane za pomocą algorytmów biblioteki OpenCV. Klasa zawiera jedną publiczną metodę o nazwie „getReceiptLines”, która przyjmuje na wejście obraz, a na wyjściu zwraca listę wyciętych, przetworzonych obrazów reprezentujących pojedyncze linii tekstu (zob. Listing 3.4).

Listing 3.4. Implementacja metody getReceiptLines

**0 public List<BufferedImage> getReceiptLines (image) {**

**1 preProcessedImage = preProcessImage (image);**

**2 croppedLinesList = findLines(preProcessedImage);**

**3 return croppedLinesList;**

**4 }**

Proces wycinania linii jest podzielony na dwa etapy. W pierwszym obraz jest przekazywany do metody „preProcessImage”, która jest przeznaczona do poprawienia jego jakości (zob. Listing 3.5). W drugim, przetworzony obraz paragonu jest przekazywany na wejście metody o nazwie findLines która, dzieli go na pojedyncze wiersze (zob. Listing 3.6). Idea tego algorytmy polega na tym, aby zwiększyć szerokość każdego występującego elementu na obrazie. To spowoduje, że wszystkie znaki, pikseli, których znajdują się na tej samej osi y, zostaną połączone w jeden obiekt reprezentujący linie. W wyniku zwracana jest lista wyciętych fragmentów obrazu wejściowego.

Listing 3.5. Przetwarzanie obrazu

**0 private void preProcessImage (image) {**

**1 removeColors(image);**

**2 bilateralFilter(image);**

**3 adaptiveThreshold(image);**

**4 morphologyOpen(image);**

**5 morphologyClose(image);**

**6 }**

Przetwarzanie obrazu zaczyna się od jego przekształcenia do skali szarości. Następnie do obrazu stosuje się bilateralny filtr, dzięki któremu ilość występowanych szumów na nim, zmniejsza się. W linii nr. 3 odbywa się binaryzacja obrazu. W tym celu został użyty algorytm adaptacyjnego progowania (ang. Adaptive Threshold), który wylicza próg każdemu pikselu, według pikseli sąsiednich. W kolejnych dwóch liniach listingu jest wykonywane morfologiczne przekształcenie obiektów znajdujących się na obrazie. Najpierw operacja otwarcia (ang. Morphology opening), usuwa zakłócenia obok liter. Następnie, aby poprawić kształty znaków, jest wykonywana operacja zamknięcia (ang. Morphology closing. Wynik każdego kroku przetwarzania jest przedstawiony na Rysunku 3.3 i Rysunku 3.4.

|  |
| --- |
| A picture containing diagram  Description automatically generated  Rysunek 3.3. Przetwarzanie obrazu-1 |

|  |
| --- |
| Qr code  Description automatically generated  Rysunek 3.4. Przetwarzanie obrazu-2 |

Listing 3.6. Wyszukiwanie linii na obrazie

**0 private List <BufferedImage> findLines (image) {**

**1 linesImage = image.clone();**

**2 bitwise(image);**

**3 erosion(linesImage);**

**4 dilation(linesImage, 0, 40);**

**5 drawRectsOfObjects(linesImage);**

**6 return** **cropLinesAndSaveToList (linesImage, image);**

**7 }**

W procesie działania algorytmu wyszukiwania linii, na obrazie zostaną same bloki reprezentujące linii. Aby zachować przekazany obraz, w pierwszej linii listingu tworzona jest kopia obrazu o nazwie „processedImage” według której będą wyszukiwane wiersze. Tesseract traktuje białe pikseli jako tło, a czarne jako tekst *[16]*. W tym celu obraz wejściowy przekazuje się do operacji negacji bitowej (ang. Bitwise), która zamienia pikseli białe na czarne, a czarne na białe. W następnych liniach listingu przetwarza się kopia obrazu. W linii nr. 3 odbywa się przekształcenie morfologiczne, zwane erozją (and. Erosion). Działanie algorytmu erozji polega na obcinaniu brzegów każdego obiektu, znajdującego się na obrazie. Jest on stosowany, aby zostawić na paragonie same znaki, a obiekty będące plamami lub brudem zmniejszyć lub całkowicie usunąć. Kolejnym użytym morfologicznym przekształceniem jest dylacja (ang. Dilation), które w przeciwieństwie do erozji – zwiększa brzegi obiektów *[17]*. Pomimo obrazu, do algorytmu dylacji zostały przekazane dwa parametry: wysokość o wartości 0 i szerokość która jest równa 40. To spowoduje, że wysokość każdego obiektu na obrazie zostanie niezmienna, natomiast szerokość zwiększy się o 40 pikseli (o 20px z lewej strony obiektu i 20px z prawej). Metoda o nazwie „drawRectsOfObjects” rysuje na całą szerokość obrazu białe prostokąty (zob. Listing 3.7). Ich wysokość i położenie są odpowiedni do każdego obiektu na obrazie. W ostatniej linii listingu jest wywoływana metoda „cropLinesAndSaveToList”, która na podstawie koordynat obiektów znajdujących się na obrazie „linesImage” wycina fragmenty z obrazu wejściowego „image”, a następnie zapisuje ich do zwracanej listy (zob. Listing 3.8). Wyniki poszczególnych kroków zostały zaprezentowane na Rysunku 3.5.

|  |
| --- |
| A picture containing diagram  Description automatically generated  Rysunek 3.5.Wyszukiwanie linii na obrazie |

Listing 3.7. Tworzenie elementów reprezentujących linii na paragonie

**0 private void drawRectsOfObjects (image) {**

**1 contours = Imgproc.findContours(image, Imgproc.RETR\_EXTERNAL,**

**2 Imgproc.CHAIN\_APPROX\_SIMPLE);**

**3 foreach (object in contours) {**

**4 rect = Imgproc.boundingRect(object);**

**5 startPoint = (0, rect.y);**

**6 endPoint = (image.width(), rect.y + rect.height );**

**7 color = (255, 255, 255);**

**8 thickness = -1;**

**9 Imgproc.rectangle(image, startPoint, endPoint, color, thickness);**

**10 }**

**11 }**

Tworzone metodą „drawRectsOfObjects” elementy, są rysowane nad każdym obiektem. W pierwszej linii listingu przy pomocy algorytmu biblioteki OpenCV, odbywa się wyszukiwanie na obrazie konturów każdego występującego na nim obiektu. Następnie w linii nr. 4, dla każdego konturu tworzony jest niejawny otaczający go prostokąt. Zawiera on takie dane jak: koordynaty swojego górnego lewego punktu, szerokość i wysokość. W linii nr 9 została użyta metoda z biblioteki OpenCV za pomocą, której na wejściowym obrazie są rysowane białe prostokąty. Do niej zostały przekazane takie atrybuty:

* obraz wejściowy,
* startowy punkt na obrazie, aby określić położenie prostokąta. Podawane w nim koordynaty górnego lewego punktu rysowanego prostokąta. Według osi „x” została przekazana wartość „0” – jako początek obrazu, natomiast według osi „y”, przekazuje się koordynata „y” lewego górnego punktu prostokąta konturu (linia nr. 5),
* punkt końcowy na obrazie, również do określenia pozycji prostokąta. Podawane w nim koordynaty dolnego prawego punktu rysowanego prostokąta. Według osi „x” została przekazana szerokość wejściowego obrazu, a według osi „y”, przekazuje się położenie dolnej krawędzi prostokąta konturu (linia nr. 6),
* kolor rysowanego prostokąta. Przekazany wektor odpowiada białemu koloru,
* grubość linii prostokąta. Wartość „-1”, oznacza, że cały obszar prostokąta zostanie pokolorowany.

Listing 3.8. Wycinanie linii z obrazu

**0 private List<BufferedImage> cropLinesAndSaveToList (linesImage, image) {**

**1 contours = Imgproc.findContours(linesImage, Imgproc.EXTERNAL,**

**2 Imgproc.CHAIN\_APPROX\_SIMPLE);**

**3 contours.sort((object1, object2) -> {**

**4 rect1 = Imgproc.boundingRect(object1);**

**5 rect2 = Imgproc.boundingRect(object2);**

**6 return Double.compare(rect1.y, rect2.y);**

**7 });**

**8 List<BufferedImage> lines = new ArrayList<>();**

**9 foreach (object in contours) {**

**10 rect = Imgproc.boundingRect(object);**

**11 croppedLine = new Mat(image, rect);**

**12 top = 10; bottom = top;**

**13 left = 5; right = left;**

**14 borderType = Core.BORDER\_ISOLATED;**

**15 color = (255, 255, 255);**

**16 lineVsBorder = Core.copyMakeBorder(croppedLine, top, bottom, left,**

**17 right, borderType, color);**

**18 BufferedImage bufferedImage = mat2BufferedImage(lineVsBorder);**

**19 lines.add(bufferedImage);**

**20 }**

**21 return lines;**

**22 }**

Metoda do wycinania linii tekstu z obrazu przyjmuje na wejście dwa atrybuty. Pierwszy przedstawia położenie linii, które zostaną wycięte z obrazu paragonu, którym jest drugi atrybut. W linii pierwszej odbywa się wyszukiwanie konturów każdego bloku reprezentującego linie. Następnie, otrzymana lista konturów jest sortowana według położenia każdego z nich na osi „y” (linii nr. 3-7). W linii nr. 8 tworzona jest lista, która będzie przechowywała obrazy wyciętych linii paragonu. Według każdego obiektu w liście, z obrazu paragonu są wycinane prostokąty, a następnie zapisywane jako macierz pikseli (tzn. obiekt obrazu w bibliotece OpenCV) do zmiennej „croppedLine” (linia nr. 11). Aby wyśrodkować tekst na wyciętej linii, wokół niej tworzone jest białe obramowanie (linia nr. 16). Przekazanymi parametrami są:

* macierz wyciętej linii,
* szerokość obramowania z każdej strony. Dla górnego i dolnego obramowania podana wartość 10 piksel, a dla lewego i prawego 5 piksel,
* jako rodzaj obramowania została podana wartość „BORDER\_ISOLATED”. Oznacza to, że obramowanie zostanie stworzone nie wewnątrz, a zewnątrz obrazu i doda do niego nowe pikseli,
* kolor obramowania jest biały, reprezentujący tło.

W linii nr. 18 gotowa macierz przekształca się do obiektu „BufferedImage”, a następnie dodaje się do zwracanej listy. Instancja tego obiektu używa się do rozpoznawania tekstu biblioteką Tesseract.

### ReceiptReaderService

Klasa o nazwie „ReceiptReaderService” jest przeznaczona do przechowywania metod za pomocą których odbywa się rozpoznawanie tekstu na paragonach. Do celów OCR używa się biblioteka Tesseract oraz wcześniej przygotowany model sieci neuronowej. Tworzenie instancji Tesseract i konfiguracja silnika odbywa się za pośrednictwem metody „createTesseractInstanse”, która jest zaprezentowana na Listingu 3.9.

Listing 3.9. Tworzenie instancji Tesseract

**0 private Tesseract createTesseractInstanse(language) {**

**1 tesseract = new Tesseract();**

**2 tesseract.setDatapath("src/main/resources/tessdata");**

**3 tesseract.setLanguage(language);**

**4 tesseract.setPageSegMode(7);**

**5 tesseract.setOcrEngineMode(1);**

**6 tesseract.setTessVariable("user\_defined\_dpi", "300");**

**7 return tesseract;**

**8 }**

Metoda przyjmuje na wejściu nazwę języka, który stworzona instancja będzie rozpoznawała. Tesseract traktuje go jako nazwę modeli sieci neuronowej. Przygotowana wcześniej model o nazwie „auchan.traineddata” została umieszczona w danym projekcie pod ścieżką „src/main/resources/tessdata”. W liniach nr. 2-3 dla instancji Tesseract ustawia się model, który on będzie używał do rozpoznawania. Następnie ustawia się wartość „7” dla parametru segmentacji, co oznacza, że obraz będzie traktowany jako pojedyncza linia. W kolejnej linii jako wartość „1”, ustawia się silnik OCR oparty o sieci neuronowe. W linii nr. 6 jest podawany DPI obrazu o wartości „300”.

W Listingu 3.10, jest zaprezentowana publiczna metoda klasy „ReceiptReaderService”, dzięki której odbywa się proces rozpoznawania danych na paragonie. W niej odczytywane są najpierw dane sklepu i spółki, a następnie informacja o zakupionych produktach. Rezultat jej działania jest zapisywany do obiektu klasy „ReceiptForm”. Zawiera on mapę „receiptItems” oraz obiekt klasy „Receipt”, które zostaną wyświetlone na stronie głównej aplikacji. Kluczem mapy jest obraz linii tekstu, a wartością jest instancja klasy „ReceiptItem”.

Listing 3.10. Odczytywanie danych z paragonu

**0 public ReceiptForm readReceiptData (imageLineList, language) {**

**1 tesseract = createTesseractInstanse(language);**

**2 result = new ReceiptForm();**

**3 market = result.getReceipt().getMarket();**

**4 lineText = "";**

**5 lineImage = null;**

**6 imageLinesIterator = imageLineList.iterator();**

**7 while (!lineText.toLowerCase().contains("paragon fiskalny")) {**

**8 if (!imageLinesIterator.hasNext())**

**9 throw new TesseractException(NO\_RECEIPT\_MESSAGE);**

**10 lineImage = imageLinesIterator.next();**

**11 lineText = tesseract.doOCR(lineImage);**

**12** **addMarketData(market, lineText);**

**13 }**

**14 while (imageLinesIterator.hasNext() && (**

**15 !lineText.toLowerCase().contains("- - - - -") ||**

**16 lineText.toLowerCase().contains("opodatk")**

**17 )) {**

**18 lineImage = imageLinesIterator.next();**

**19 lineText = tesseract.doOCR(lineImage);**

**20 addReceiptItem(result, lineImage, lineText);**

**21 }**

**22 return result;**

**23 }**

**14 while (imageLinesIterator.hasNext() && (**

**15 !lineText.toLowerCase().contains("- - - - -") ||**

**16 lineText.toLowerCase().contains("opodatk")**

**17 )) {**

**18 lineImage = imageLinesIterator.next();**

**19 lineText = tesseract.doOCR(lineImage);**

**20 addReceiptItem(result, lineImage, lineText);**

**21 }**

**22 return result;**

**23 }**

Przekazanymi parametrami są lista wyciętych z paragonu linii oraz nazwa modeli sieci neuronowej. Najpierw jest tworzona instancja Tesseract, a następnie są ustawiane wartości niezbędnych zmiennych. Zmienna „market” zawiera informację o nazwie sklepu i spółki oraz ich adresy. W „lineImage” znajduję się obraz konkretnej linii, a rozpoznany na nim tekst jest zapisywany do zmiennej „lineText”. Na przekazywanych do aplikacji paragonach informacja dotycząca sklepu, jest podawana w pierwszych wierszach aż do linii w którym jest zamieszczona nazwa dokumentu. Na podstawie tego w liniach nr. 7-13 odbywa się iteracja od pierwszego wiersza paragonu do momentu aż, póki rozpoznany przez Tesseract tekst, nie będzie zawierał napisu „paragon fiskalny”. W przypadku gdy się nie uda znaleźć taką linijkę, to metoda wyrzuci wyjątek z informacją o tym, że na obrazie nie ma paragonu fiskalnego. W linii nr. 10 jest pobierany kolejny obraz z listy wejściowej, a w następnej odbywa się rozpoznawanie tekstu przy pomocy Tesseract. Aby zdefiniować jakie dane dotyczące sklepu zawiera tekst, jest on przekazywany do metody „addMarketData” (zob. Listing 3.11). Linii na paragonie znajdujące się pomiędzy nazwą dokumentu, a informacją o podatkach, zawierają informację o zakupionych produktach. Czasami, po nich występuje linia z kilkoma myślnikami, która oznacza koniec listy produktów. Dla tego w liniach nr. 14-21 proces iteracji kontynuuje się aż do końca wejściowej listy lub jeżeli rozpoznany na obrazie tekst zawiera minimum 5 myślników albo skrót od słowa „opodatkowanie”. Rozpoznany z obrazu tekst wraz z obrazem linii przekazują się do metody „addReceiptItem” (zob. Listing 3.12), aby dodać informację o każdym produkcie do zwracanego obiektu.

### HomeController

Klasa ta jest jedynym kontrolerem w aplikacji. W wyniku działania każdej mapującej jego funkcji jest zwracany widok o nazwie “home”, implementacja którego znajduje się w pliku “home.html”. W zależności od żądania, kontroler przekazuje do tego widoku odpowiednie atrybuty, które są w nim wyświetlane lub nie. Przykładem takiego atrybutu jest “receiptForm”, który przekazuje się do widoku w każdym żądaniu. Jest to obiekt klasy ReceiptForm, która zawiera w sobie dane paragonu. Kierowanie do ścieżki "\home", spowoduje, że kontroler przekaże do przeglądarki widok z pustymi znaczeniami atrybutu “receiptForm”. Zaimplementowana za pośrednictwem Thymeleaf logika wyświetli na stronie dwa przyciski. Pierwszy z nich jest przeznaczony do wybierania paragonu, tekst, którego należy rozpoznać, a drugi do przekazywania wybranego obrazu do serwera. Podczas wysyłania pliku, przeglądarka kieruje się do ścieżki “\upload”, która w kontrolerze jest zmapowana z metodą o nazwie “readText”. Jej logika została przedstawiona w postaci pseudokodu na listingu 3.4. {TODO} listing 3.3: Metoda kierująca procesem rozpoznawania.

**1 @PostMapping("/upload")**

**2 String readText (receiptImage, attributes) {**

**3 receiptLines [] = openCvService.getReceiptLines(receiptImage)**

**4 receiptForm = receiptReaderService.readReceiptData(receiptLines,”auchan”)**

**5 attributes.addFlashAttribute("receiptForm", receiptForm)**

**6 return "redirect:/home"**

**7 }**

Proces rozpoznawania tekstu zaczyna się od linii 3, w której odbywa się przetwarzanie wstępne. W tym kroku za pomocą klasy “OpenCvService” przekazany do serwera obraz opracowuje się w celu ulepszenia jego jakości, a następnie zawarty w tej klasie algorytm wyodrębnia z paragonu wiersze i zapisuje ich do zwracanej listy. W kolejnej linii ta lista przekazuje się do metody klasy “ReceiptReaderService”, w której odbywa się rozpoznawanie tekstu na każdym jej elemencie. Informacja zawarta w paragonie jest zapisywana do obiektu receiptForm, a następnie w linii 5, ten obiekt jest dodawany do listy atrybutów widoku. W linii 6, widok „home”, wraz z uzupełnionym atrybutem przekazują się z powrotem do przeglądarki.

Końcowym rezultatem jest wyświetlanie danych zawartych w paragonie, na stronie głównej aplikacji. Jej wygląd jest umieszczony w postaci rzutu ekranu na Rysunku 3.3.

|  |
| --- |
| Rysunek 3.6. Widok strony głównej aplikacji, po rozpoznaniu teksta z paragonu. |

Po prawej stronie znajduje się początkowy obraz paragonu, który został przekazany do systemu, a po lewej są zgrupowane jego dane. W pierwszej kolejności podane są dane sklepu, takie, jak nazwa, adres, nazwa spółki oraz jej adres. W kolejnym kroku została wymieniona lista artykułów. Jej elementy składają się z obrazu, którym jest wyodrębniony wiersz i rozpoznanych na nim danych, którymi są nazwa artykułu, zakupiona ilość, cena za jednostkę, suma ilości i ceny oraz typ podatku. W przypadku, gdyby wyświetlona lista zawierała błędy, użytkownik ma możliwość ich poprawienia. Na samym dole znajduje się przycisk “Akceptuj”, za pomocą którego dane paragonu, można zapisać w bazie danych.

## Testy i rezultaty rozpoznawania

### Test silnika Tesseract

Aby sprawdzić na ile poprawi się jakość silnika OCR po treningu, wstępnie przeprowadziłem test na paragonach, których nie będę używał podczas uczenia. Jest to kolejny przygotowany zbiór składający się z 8 plików formatu lstmf. Do oceny działania modeli LSTM służy program będący częścią oprogramowania Tesseract o nazwie lstmeval. Podałem na jego wejście ścieżkę do modeli w postaci pliku “pol.traineddata” oraz listę przygotowanych do testów danych:

**lstmeval --model pol.traineddata --eval\_listfile testing\_files.txt**

Wynik jest pokazywany w postaci znakowego współczynnika błędu, wartość którego w tym wypadku wyniosła 39.272847%. W przypadku wytrenowanego pliku o nazwie “auchan.traineddata”, wartość ta zmniejszyła się o 32.4348045% i wynosi 6.8380425%.

### Test aplikacji

Podczas testowania aplikacji była sprawdzana poprawność rozpoznawania kwoty wydanej za towar. Dodatkowo brały się pod uwagę cena jednostkowa towaru i zakupiona ilość. Kwota sprzedaży, oznakowana na paragonie jako „SUMA PLN”, jest wyznacznikiem tego czy każdy towar na paragonie został poprawnie rozpoznany. Oto kryteria według których było uznawane, że dane na paragonie zostały poprawnie rozpoznane:

1. Ilość towarów na obrazie odpowiada ilości rozpoznanych towarów.
2. Iloczyn ceny jednostkowej towaru i jego zakupionej ilości jest równy kwocie wydanej za towar. Dodatkowo musi on odpowiadać kwocie za ten towar na obrazie.
3. Suma kwot wszystkich towarów, jest równa kwocie sprzedaży. Wartość ta musi odpowiadać liczbie znajdującej się na obrazie w linijce „SUMA PLN”.

Do testów został przekazany zbiór danych, składający się z 8 obrazów. Obrazem, jest zeskanowany paragon, który nie był używany na etapie uczenia Tesseract. Rezultaty testu, uwzględniając osiągnięcie wymaganych kryterium, zostali zaprezentowane w Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Rezultaty rozpoznawania paragonów.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nazwa obrazu** | Kryterium 1 | Kryterium 2 | Kryterium 3 | Spełnia wszystkie kryteria |
| Paragon0.png | spełniony | spełniony | spełniony | TAK |
| Paragon1.png | spełniony | spełniony | spełniony | TAK |
| Paragon2.png | spełniony | spełniony | spełniony | TAK |
| Paragon3.png | spełniony | spełniony | spełniony | TAK |
| Paragon4.png | spełniony | spełniony | spełniony | TAK |
| Paragon5.png | spełniony | spełniony | spełniony | TAK |
| Paragon6.png | spełniony | nie spełniony | nie spełniony | NIE |
| Paragon7.png | spełniony | spełniony | spełniony | TAK |

Obraz o nazwie Paragon6.png nie spełnił drugiego kryterium, co stało powodem niezaliczenia trzeciego kryterium. Przyczyną tego, jest to, że Tesseract nie rozpoznał liczby jeden, która reprezentowała ilość zakupionego towaru o nazwie „LOYD ZI MATCHA 20P”. To spowodowało, że aplikacja nie przyjęła do uwagi jego dane. A różnica pomiędzy wyliczonej sumy kwot wszystkich towarów, a prawdziwej wyniosła 5.59zł.

### Paragony użyte do testów

|  |
| --- |
| Text, letter  Description automatically generated  Rysunek 3.7. Paragon0.png |

|  |
| --- |
| Text, letter  Description automatically generated  Rysunek 3.8. Paragon1.png |

|  |
| --- |
| **Text, letter  Description automatically generated**  Rysunek 3.9. Paragon2.png |

|  |
| --- |
| **Text, letter  Description automatically generated**  Rysunek 3.10. Paragon3.png |

|  |
| --- |
| **Text  Description automatically generated**  Rysunek 3.11. Paragon4.png |

|  |
| --- |
| **Text  Description automatically generated with medium confidence**  Rysunek 3.12. Paragon5.png |

|  |
| --- |
| **Text, letter  Description automatically generated**  Rysunek 3.13. Paragon6.png |

|  |
| --- |
| **Text, letter  Description automatically generated**  Rysunek 3.14. Paragon7.png |

|  |
| --- |
|  |

# Podsumowanie

# Bibliografia

[1] – Piyush V., *Tesseract OCR with Java with Examples*, <https://www.geeksforgeeks.org/tesseract-ocr-with-java-with-examples/>, (dostęp 07.2021).

[2] – Karandish F., *The Comprehensive Guide to Optical Character Recognition (OCR),* <https://moov.ai/en/blog/optical-character-recognition-ocr/>, (dostęp 07.2021).

[3] – Tadeusiewicz R. (1993), *Sieci neuronowe,* Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 2 wydanie.

[4] – Stęgowski Z. (2004), *Sztuczne sieci neuronowe*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Kraków.

[5] – Nielsen M. (2019), Neural Networks and Deep Learning, <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/index.html>, (dostęp 07.2021).

[6] – Miernik T., *Wykonanie sztucznej sieci neuronowej do klasyfikacji depesz agencyjnych,* [*https://www.researchgate.net/profile/Tomasz-Miernik/publication/239974791\_Wykonanie\_sztucznej\_sieci\_neuronowej\_do\_klasyfikacji\_depesz\_agencyjnych\_Implementation\_of\_neural\_network\_to\_classify\_Reuters\_telegrams\_POLISH\_LANGUAGE/links/00b4951c4279026456000000/Wykonanie-sztucznej-sieci-neuronowej-do-klasyfikacji-depesz-agencyjnych-Implementation-of-neural-network-to-classify-Reuters-telegrams-POLISH-LANGUAGE.pdf*](https://www.researchgate.net/profile/Tomasz-Miernik/publication/239974791_Wykonanie_sztucznej_sieci_neuronowej_do_klasyfikacji_depesz_agencyjnych_Implementation_of_neural_network_to_classify_Reuters_telegrams_POLISH_LANGUAGE/links/00b4951c4279026456000000/Wykonanie-sztucznej-sieci-neuronowej-do-klasyfikacji-depesz-agencyjnych-Implementation-of-neural-network-to-classify-Reuters-telegrams-POLISH-LANGUAGE.pdf)*,* (dostęp 07.2021).

[7] – Łącki M. (2016), *Intelligent prediction of ship maneuvering,* TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 10 (3), pp. 511-516.

[8] – Dobrosielski W. (2010), *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do rozpoznawania obrazów,* *Studia i Materiały Informatyki Stosowanej Tom 2, Nr 3,* Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz.

[9] – Stateczny A. (2002), *Sztuczne sieci neuronowe w rozpoznawaniu obiektów morskich*, GTN, Gdynia.

[10] – Dawida S. (2020), *Wykorzystanie sieci neuronowych do rozpoznawania statycznych gestów dłońmi do sterowania robotem mobilnym z wykorzystaniem kamery,* [*http://perception.wsiz.rzeszow.pl/wp-content/uploads/2020/01/Dawida\_Sylwester\_praca\_inz\_2020.pdf*](http://perception.wsiz.rzeszow.pl/wp-content/uploads/2020/01/Dawida_Sylwester_praca_inz_2020.pdf)*,* (dostęp 07.2021).

[11] – Srivastala P. (10.12.2017), *Essentials of Deep Learning : Introduction to Long Short Term Memory*, <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/12/fundamentals-of-deep-learning-introduction-to-lstm/>, (dostęp 07.2021).

[12] – Dorobek M. (2020), *Generating Jazz Chords Progressions Using Word Embeddings and Recurrent Neural Networks, https://www.mateuszdorobek.pl/files/MasterThesis/MastersThesisMateuszDorobek.pdf,* (dostęp 07.2021).

[13] – Olah C. (2015), *Understanding LSTM Networks*,

https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/,(dostęp 07.2021).

[14] – Ogan. L (2018), *Sieci neuronowe generują muzykę – część 3 cyklu*, <https://blog.lukaszogan.com/informatyka/rekurencyjne-sieci-neuronowe-generuja-muzyke/>, (dostęp 07.2021).

[15] – *Tess4j, JNA wrapper for Teseract,* <http://tess4j.sourceforge.net/>, (dostęp 07.2021).

[16] – Tesseract documentation, *Improving the quality of the output*, <https://tesseract-ocr.github.io/tessdoc/ImproveQuality>, (dostęp 07.2021).

[17] –Radzieński M. (2007), *Typowe przekształcenia morfologiczne*, <http://atol.am.gdynia.pl/tc/Radzienski/morfologiczne.htm>, (dostęp 07.2021).