

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
INSTYTUT STEROWANIA I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ

PRACA MAGISTERSKA
na kierunku INFORMATYKA



Marcin LEWKOWICZ
Nr imm.: 181943

Rok. akad. 2005/2006
Warszawa, 13.12.2006r.

**IDENTYFIKACJA I ROZPOZNAWANIE NUMEROW TABLIC
REJESTRACYJNYCH POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH NA
SEKWENCJACH OBRAZÓW WRAZ Z ANALIZĄ PARAMETRÓW RUCHU**

Zakres pracy:

1. *Wstęp oraz cel pracy.*
2. *Prezentacja istniejących systemów Automatycznego Rozpoznawania Tablic Rejestracyjnych oraz wykorzystywanych algorytmów.*
3. *Analiza problemów związanych z akwizycją sekwencji obrazów.*
4. *Realizacja systemu rozpoznawania tablic rejestracyjnych z wyznaczaniem parametrów ruchu, z wykorzystaniem zaawansowanej biblioteki przetwarzania i rozpoznawania obrazów OpenCV.*
5. *Wyniki działania programu oraz napotkane trudności.*
6. *Wnioski i podsumowanie.*

Opiekun naukowy:
dr inż. Witold Czajewski
(*podpis*)

Podpis i pieczętka
Kierownika Zakładu Dydaktycznego

Konsultant:

(podpis – jeśli jest konieczny)

Termin wykonania: grudzień 2006.
Praca wykonana i zaliczona pozostaje własnością
Instytutu i nie będzie zwrócona wykonawcy

SPIS TREŚCI

1.	WSTĘP.....	4
2.	ROZPOZNAWANIE TABLIC REJESTRACYJNYCH	9
2.1.	WSTĘP.....	9
2.2.	WARUNKI PRAWNE DOTYCZĄCE TABLIC REJESTRACYJNYCH.....	10
2.2.1.	<i>Kształt tablic rejestracyjnych</i>	10
2.2.2.	<i>Składnia numerów rejestracyjnych.....</i>	10
2.2.3.	<i>Umieszczanie tablic rejestracyjnych.....</i>	11
2.3.	ROZPOZNAWANIE STATYCZNE I DYNAMICZNE.....	13
2.4.	ISTNIEJĄCE SYSTEMY ARTR	15
2.5.	PODSTAWOWE ETAPY ROZPOZNAWANIA	16
2.6.	LOKALIZACJA TABLICY REJESTRACYJNEJ	17
2.6.1.	<i>Wstęp.....</i>	17
2.6.2.	<i>Znane algorytmy lokalizacji tablic rejestracyjnych.....</i>	18
2.6.3.	<i>Lokalizacja tablic przy użyciu tzw. sygnatur.....</i>	18
2.6.4.	<i>Lokalizacja tablic przy użyciu analizy teksturalnej</i>	20
2.6.5.	<i>Lokalizacja tablic przy użyciu operacji morfologicznych</i>	25
2.7.	SEGMENTACJA ZNAKÓW.....	29
2.7.1.	<i>Wstęp</i>	29
2.7.2.	<i>Segmentacja znaków przy użyciu rzutu jasności.....</i>	29
2.7.3.	<i>Segmentacja znaków przy użyciu elementów połączonych</i>	31
2.8.	ROZPOZNAWANIE ZNAKÓW	34
2.8.1.	<i>Wstęp</i>	34
2.8.2.	<i>Rozpoznawanie znaków przy użyciu rzutu jasności</i>	35
2.8.3.	<i>Rozpoznawanie znaków przy użyciu cech gęstościowych (szablonów).....</i>	36
3.	AKWIZYCJA SEKWENCJI OBRAZÓW.....	38
3.1.	WSTĘP.....	38
3.2.	ZASTOSOWANY SPRZĘT	38
3.3.	ANALIZA PROBLEMÓW WYSTĘPUJĄCYCH PRZY AKWIZYCJI SEKWENCJI ZDJĘĆ..40	40
3.3.1.	<i>Jasność, oświetlenie</i>	40
3.3.2.	<i>Problem ekspozycji</i>	41
3.3.3.	<i>Rozmycie pochodzące od ruchu pojazdów</i>	43
3.3.4.	<i>Odbicia (refleksy świetlne).....</i>	45
3.3.5.	<i>Warunki atmosferyczne</i>	45
3.3.6.	<i>Cienie</i>	46
3.3.7.	<i>Przesłanianie</i>	49

3.3.8. <i>Rozdzielczość oraz szybkość transmisji</i>	50
3.4. UMIEJSCOWIENIE APARATU ORAZ OBSZAR REJESTRACJI	51
3.5. PODSUMOWANIE JAKOŚCI ZASTOSOWANYCH APARATÓW CYFROWYCH	56
3.6. WYZNACZANIE CZASU REJESTRACJI ZDJĘĆ.....	57
3.6.1. <i>Metody wyznaczania czasu rejestracji zdjęć</i>	57
3.6.2. <i>Nagłówek EXIF</i>	57
3.7. BADANIE CZĘSTOTLIWOŚCI REJESTRACJI ZDJĘĆ SEKWENCYJNYCH	57
3.7.1. <i>Wykorzystanie stopera – eksperymenty</i>	58
3.7.2. <i>Metoda akustyczna – eksperymenty</i>	60
3.7.3. <i>Podsumowanie wyników</i>	63
4. REALIZACJA PROGRAMU DO ANALIZY SEKWENCJI OBRAZÓW	64
4.1. WSTĘP.....	64
4.2. OPIS FUNKCJONALNY PROGRAMU	64
4.3. ZASADA DZIAŁANIA PROGRAMU	65
4.4. WCZYTYWANIE SEKWENCJI OBRAZÓW.....	66
4.5. WYKORZYSTANE ALGORYTMY – BADANIA I ROZWÓJ.....	66
4.5.1. <i>Wyznaczanie oczekiwanej rozmiaru tablicy rejestracyjnej</i>	66
4.5.2. <i>Lokalizacja tablicy rejestracyjnej – wariant I – metoda „sygnatur”</i>	68
4.5.3. <i>Wydzielanie znaków tablicy rejestracyjnej – wariant I – rzut jasności</i>	74
4.5.4. <i>Wydzielanie znaków tablicy rejestracyjnej – wariant II – metoda konturowa</i>	79
4.5.5. <i>Lokalizacja tablicy rejestracyjnej – wariant II – metoda konturowa</i>	82
4.5.6. <i>Rozpoznawanie znaków</i>	82
4.5.7. <i>Analiza składniowa numerów rejestracyjnych wraz z korekcją</i>	85
4.5.8. <i>Wyznaczanie prędkości pojazdów</i>	87
5. WYNIKI BADAŃ	93
5.1.1. <i>Dokładność rozpoznawania tablic</i>	93
5.1.2. <i>Analiza błędów rozpoznawania tablic rejestracyjnych</i>	96
5.1.3. <i>Dokładność wyznaczania prędkości</i>	99
5.1.4. <i>Szybkość przetwarzania obrazów</i>	100
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	102
BIBLIOGRAFIA.....	104
ANEKS	107

1. Wstęp

Automatyzacja wkracza coraz szerzej do wszelkich dziedzin życia. Nie ominęło to także transportu drogowego. Coraz częściej wykorzystuje się różne systemy automatycznej kontroli i sterowania ruchem drogowym, nazywane ogólnie Systemami Inteligentnego Transportu. Rozbudowa infrastruktury, ciągły rozwój motoryzacji oraz wciąż zwiększająca się liczba pojazdów poruszających się po drogach pojazdów powodują, że dalsza rozbudowa infrastruktury, oraz nadzór nad już istniejącą, jest coraz trudniejsza. W celu poprawy tej sytuacji rozpoczęły się próby automatyzowania pewnych czynności.

Doniesienia o pierwszych systemach inteligentnego transportu pochodzą z lat 90. XX wieku. Był to czas zarówno gwałtownego rozwoju technologii komputerowych jak i szybkiego rozwoju infrastruktury. Ogólna koncepcja systemów inteligentnego transportu pojawiła się na pierwszej konferencji ITS World Congress w 1994 r. Zdefiniowano wtedy pojęcie Systemów Inteligentnego Transportu – ITS (ang. Intelligent Transportation System) oraz określono cele ich stosowania. Od tego czasu systemy te są intensywnie rozwijane zarówno w warunkach przemysłowych jak i akademickich. Głównym zadaniem tych systemów jest rozwiązywanie problemów transportowych przy pomocy technologii informacyjnych oraz telekomunikacyjnych [2].

Jedną z najważniejszych dziedzin transportu jest transport drogowy. Na podstawie danych udostępnianych przez Główny Urząd Statystyczny, w roku 2005 w Polsce, drogowy transport towarowy stanowił 75,9% ogółu transportu towarowego, natomiast drogowy transport pasażerski obejmował 74,7% wszystkich pasażerów [13]. Ze względu na nieproporcjonalny rozwój infrastruktury, pojawiają się następujące problemy w tej dziedzinie transportu [10]:

- postępujący wzrost przeciążenia układu drogowego
- wzrastający deficyt miejsc parkingowych
- rosnące zanieczyszczenie środowiska

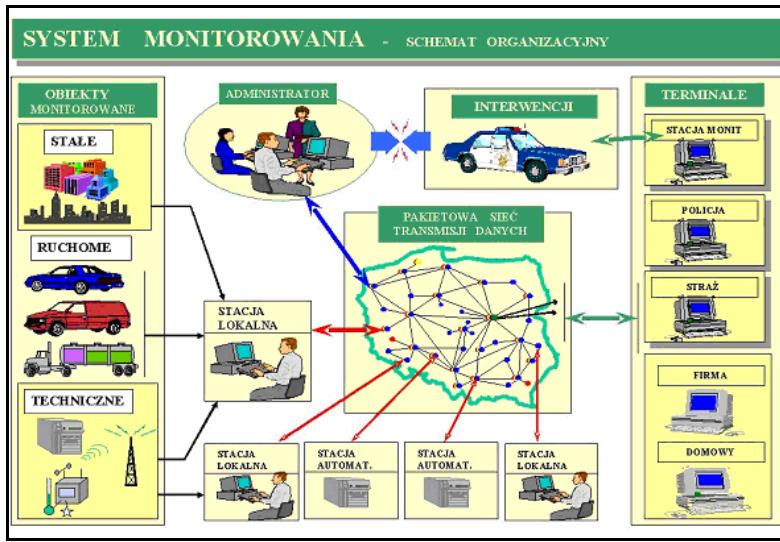
W obliczu tych problemów konieczne staje się wdrażanie systemów monitorowania i zarządzania ruchem, będących częścią Systemu Inteligentnego Transportu. Według różnych badań systemy takie pozwalają na zwiększenie przepustowości sieci transportowej nawet o 20% bez konieczności wykonywania

dodatkowych inwestycji drogowych. Dzięki tym systemom zmniejsza się liczba zatorów drogowych, a co za tym idzie skraca się czas podróży i zmniejsza zanieczyszczenie środowiska. Niebagatelną kwestią jest również zmniejszenie liczby wypadków drogowych [26].

„Powszechnie zastosowanie komputerów oraz sterowników mikroprocesorowych pozwala na powiększanie obszarów geograficznych i obszarów zastosowań systemów sterowania, oraz na pełną integrację poszczególnych podsystemów. Możliwe jest to dzięki rozwojowi szybkich i niezawodnych podsystemów zbierania i transmisji danych, oraz dużych możliwości obliczeniowych nowoczesnych komputerów. Zastosowanie coraz nowszego i szybszego sprzętu komputerowego oraz technik telekomunikacyjnych (telematyki) spowodowało, że nowoczesne, zaawansowane systemy zarządzania ruchem mogą przyjąć na siebie coraz więcej zadań. Cele systemów sterowania w stosunku do tradycyjnych zostały zmodyfikowane i nie obejmują już tylko maksymalizacji wykorzystania przepustowości i realizowania priorytetów dla transportu zbiorowego, ale mogą w sposób zintegrowany pomagać rozwiązywać wiele problemów transportowych miast, obszarów oraz dróg szybkiego ruchu.” [26].

Systemy monitorowania i zarządzania ruchem, mogą być bardzo rozbudowane (Rysunek 1). Co więcej, mogą one być zintegrowane z innymi modułami monitorowania, np. obiektów stałych. W najbardziej rozbudowanej wersji, systemy monitorowania i zarządzania ruchem mogą obejmować takie zagadnienia jak [10]:

- adaptacyjne sterowanie sygnalizacją świetlną
- monitorowanie i informowanie o sytuacji na drogach
- sterowanie potokami ruchu
- ułatwianie przejazdu pojazdom uprzywilejowanym



Rysunek 1. Schemat organizacyjny systemu monitorowania i zarządzania. Źródło: Elite Centrum (<http://www.elte.fpl/?id=pr1>).

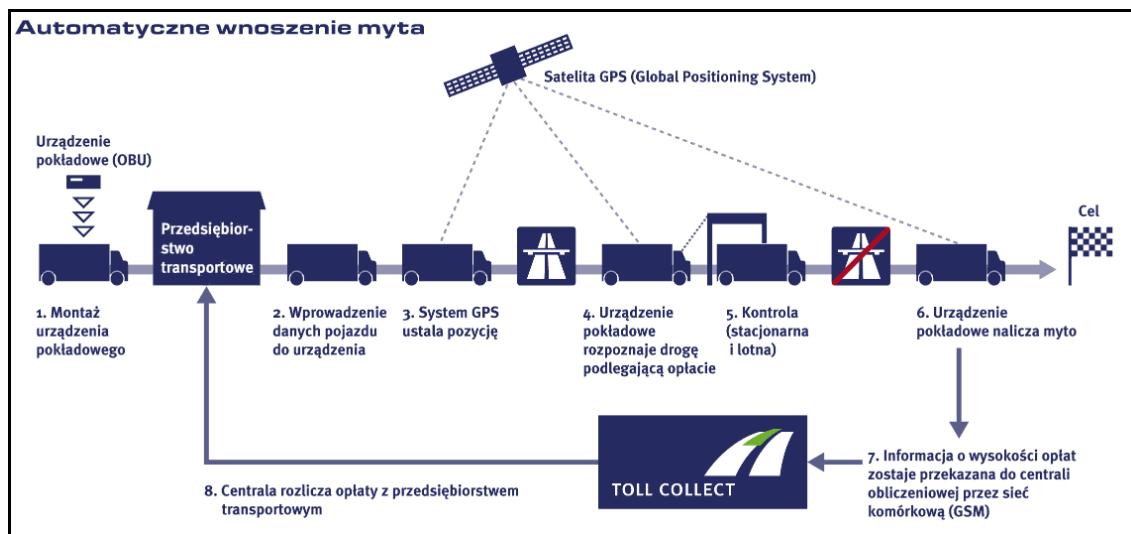
Dzięki dynamicznemu rozwojowi różnych technologii, obecnie możliwe jest tworzenie systemów identyfikujących i rozpoznających tablice rejestracyjne pojazdów oraz systemów umożliwiających analizę ruchu pojedynczych pojazdów. Wykorzystuje się je przede wszystkim do wykrywania wykroczeń w ruchu drogowym, ale także do tworzenia statystyk ruchu drogowego oraz sterowania tym ruchem. Przykładowymi zadaniami systemów identyfikacji i śledzenia pojazdów są:

- detekcja skradzionych pojazdów
- detekcja przekraczania prędkości
- detekcja przejazdu na czerwonym świetle
- wykrywanie nieprawidłowego wyprzedzania, przekraczanie ciągłych linii

Identyfikacja pojazdów może następować na różne sposoby. Najpewniejszym sposobem jest wyposażenie pojazdu w elektroniczny identyfikator, komunikujący się z systemem monitorującym. Rozwiążanie te, chociaż najprostsze w budowie, jest najtrudniejsze w praktycznym zastosowaniu, ponieważ mimo coraz większej informatyzacji wszelkich dziedzin życia, prawo ruchu drogowego w większości krajów nie przewiduje obowiązku umieszczania elektronicznych identyfikatorów w pojazdach. Z tego względu systemy z identyfikatorem elektronicznym stosuje się w przypadku, gdy system ma obsługiwać znaną grupę pojazdów, w których administrator systemu może wymusić umieszczenie takiego urządzenia. Przykładem zastosowania

może być umieszczanie elektronicznych identyfikatorów umożliwiający wjazd na parking.

Jednym z wyjątków od tej zasady jest, wprowadzony w 2004 roku, system elektronicznego pobierania opłat za przejazd drogami płatnymi w Niemczech – Toll Collect [30]. W systemie tym wykorzystuje się istniejące już technologie, takie jak system globalnego pozycjonowania (GPS – ang. Global Positioning System) oraz popularną obecnie telefony komórkowej (GSM – ang. Global System for Mobile Communication). System umożliwia identyfikowanie oraz śledzenie pojazdów, dzięki czemu możliwe jest precyzyjne pobieranie opłat według przejechanych odcinków płatnych dróg z dokładnością do 1 kilometra. Dzięki temu rozwiązaniu, ruch na płatnych drogach nie zostaje zakłócony na przykład przez bramki poboru opłat. Nie było też konieczności budowy dodatkowych obiektów, przez co koszty wdrożenia systemu zostały mocno ograniczone.



Rysunek 2. Schemat działania systemu Toll Collect w trybie automatycznym. Źródło: [30].

W związku z ograniczeniami wynikającymi ze stosowania zdalnych elektronicznych identyfikatorów, korzystnym sposobem na identyfikację pojazdów wydaje się być użycie istniejących już identyfikatorów, jakimi są tablice rejestracyjne. Ze względu na wymagania prawne, można założyć, że wszystkie pojazdy samochodowe poruszające się po drogach publicznych posiadają tablicę rejestracyjną. Dodatkowo tablice te mają znormalizowane parametry, dzięki czemu możliwe jest stosowanie automatycznych algorytmów rozpoznających numery rejestracyjne. Systemy

korzystające z takiego sposobu identyfikacji pojazdów, nazywa się w ogólności systemami Automatycznego Rozpoznawania Tablic Rejestracyjnych (ARTR).

Niniejsza praca stanowi próbę przedstawienia i usystematyzowanie istniejących rozwiązań w dziedzinie automatycznego rozpoznawania tablic rejestracyjnych oraz próbę opracowania własnego rozwiązania bazującego zarówno na istniejących już osiągnięciach w tej dziedzinie, jak i na własnych odkryciach i badaniach. Dodatkowo, rozwinięciem pracy ma być opracowanie algorytmu określania pewnych parametrów ruchu pojazdów, a w szczególności ich prędkości.

2. Rozpoznawanie tablic rejestracyjnych

2.1. Wstęp

Automatyczne Rozpoznawanie Tablic Rejestracyjnych (ARTR), znane jest też pod nazwami License Plate Recognition (LPR) oraz Automatic Number Plate Recognition (ANPR). Jest to technika pozwalająca na automatyczne odczytywanie numerów rejestracyjnych na podstawie zdjęć rejestrowanych przez kamerę cyfrową. Rozwiązanie takie uzyskuje się poprzez połączenie komputera z kamerą cyfrową wysokiej rozdzielczości oraz specjalistycznego oprogramowania komputerowego potrafiącego pozyskać oraz zanalizować obraz z tej kamery [27]. Analiza obrazu z kamery polega na zlokalizowaniu pojazdu, odnalezieniu tablicy rejestracyjnej, rozpoznaniu tej tablicy, oraz podjęciu odpowiedniej akcji [16].

Pierwsze systemy tego typu wymagały, aby pojazd znajdował się w dokładnie określonej pozycji względem kamery i nie poruszał się. Ten sposób rozpoznawania tablic nazywany jest **rozpoznaniem statycznym**. Aby ułatwić kierowcom właściwe ustawnienie pojazdu względem kamery, stosuje się specjalne bramki. Tylko jeden pojazd w danym czasie może być identyfikowany. Aby zwiększyć liczbę identyfikowanych pojazdów, zwiększa się liczbę bramek. Rozwiązanie takie stosowane jest np. na parkingu Portu Lotniczego im. Fryderyka Chopina w Warszawie.

Obecnie, dzięki szybkiemu rozwojowi informatyki i elektroniki, możliwe jest rozpoznawanie tablic rejestracyjnych w czasie rzeczywistym w regularnym ruchu drogowym. Rozpoznawanie takie nazywa się **rozpoznaniem dynamicznym**. Jest to zadanie trudne ze względu na specyficzne warunki pracy takiego systemu – złożoność otoczenia oraz zakłócenia, takie jak złe warunki atmosferyczne czy słabe oświetlenie. Systemy tego typu są coraz częściej stosowane w Zachodniej Europie i powoli zaczynają wkraczać do Polski.

Systemy automatycznego rozpoznawania tablic rejestracyjnych mają wiele zastosowań w Systemach Inteligentnego Transportu takich jak: pobieranie opłat parkingowych, pobieranie opłat przejazdowych oraz tworzenie statystyk ruchu [15].

2.2. Warunki prawne dotyczące tablic rejestracyjnych

Tworząc system automatycznego rozpoznawania tablic rejestracyjnych warto znać regulacje prawne dotyczące tychże tablic, w szczególności: jak wyglądają, jakie mogą zawierać znaki, jaka jest ich składnia oraz gdzie mogą być umieszczone.

2.2.1. Kształt tablic rejestracyjnych

Obecnie w Polsce funkcjonują dwa ogólne typy tablic rejestracyjnych. Ze względu na to, że obecnie wydawane są jedynie tablice nowego typu, potocznie mówi się o „starych” i „nowych” tablicach rejestracyjnych.

Stare tablice rejestracyjne, to tablice, które były wydawane w latach 1976-2000. Tablice te zawierają białe litery na czarnym tle. Przykład takiej tablicy znajduje się na rysunku 3.



Rysunek 3. Stara tablica rejestracyjna.

Nowe tablice rejestracyjne, to tablice, które były wydawane po roku 2000. Tablice te zawierają czarne znaki na białym tle oraz niebieski pasek zawierający znaki „PL” oraz flagę narodową lub symbol Unii Europejskiej. Przykłady takich tablic znajdują się na rysunku 4.



Rysunek 4. Nowe tablice rejestracyjne: (a) z flagą;
(b) z symbolem Unii Europejskiej.

2.2.2. Składnia numerów rejestracyjnych

Numer rejestracyjny składa się z: wyróżnika regionu oraz wyróżnika pojazdu. Dodatkowo w nowych tablicach rejestracyjnych wprowadzono podział wyróżnika regionu na wyróżnik województwa oraz wyróżnik powiatu. Pierwsza litera numeru stanowi wyróżnik województwa, natomiast druga lub druga i trzecia – wyróżnik powiatu. Rozróżnia się tablice miejskie (z jednoliterowym wyróżnikiem powiatu) i tablice ziemskie (z dwuliterowym wyróżnikiem powiatu). Możliwe są następujące

kombinacje numerów rejestracyjnych (oznaczenia: A – litera, pełen zasób; S – litera, ograniczony zasób; 1 – cyfra):

- miejskie:
 - AA 11111
 - AA 1111S
 - AA 111SS
 - AA S11111
 - AA SS11111
- ziemskie:
 - AAA S111
 - AAA 11SS
 - AAA 1S11
 - AAA 11S1
 - AAA 1SS1
 - AAA SS11
 - AAA 11111
 - AAA 1111S
 - AAA 111SS

Znaki, które mogą być stosowane na tablicy rejestracyjnej są zdefiniowane w ustawie o rejestracji pojazdów: „§ 21. 1. Numery rejestracyjne są tworzone ze zbioru następujących 25 liter: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, R, S, T, U, V, W, X, Y i Z oraz cyfr od 0 do 9.” [23].

Dodatkowo ustawa ogranicza liczbę znaków, które mogą być stosowane jako wyróżnik pojazdu: „§ 22. 1. Wyróżnik pojazdu, określa organ rejestrujący, posługując się zestawem cyfr i liter stanowiących pojemność rejestracyjną, z wyłączeniem liter B, D, I, O i Z.” [23]. Ograniczenie te wprowadzono ze względu na łatwą możliwość pomylenia wymienionych wyżej liter z innymi znakami, np. literę B z cyfrą 8. Pewne zastrzeżenia budzić może jedynie brak ograniczeń stosowania litery „S”, która może być pomylona z cyfrą 5.

2.2.3. Umieszczanie tablic rejestracyjnych

Obowiązujące obecnie Rozporządzenie Ministra Infrastruktury [23] gwarantuje, że każdy pojazd samochodowy musi posiadać zarówno przednią jak i tylną tablicę rejestracyjną. Paragraf 2, punkt 1 tego przepisu mówi: „Właściciel pojazdu umieszcza

na pojeździe tablice z przodu i z tyłu w miejscach konstrukcyjnie do tego przeznaczonych, z wyjątkiem przyczep, ciągników rolniczych, motocykli i motorowerów, na których tablice umieszcza się tylko z tyłu, z zastrzeżeniem ust. 2.” [23]. Dzięki temu można konstruować systemy ARTR korzystające zarówno z przednich jak i z tylnych tablic rejestracyjnych, z zastrzeżeniem, że systemy korzystające z przednich tablic rejestracyjnych nie będą w stanie rozpoznawać pewnych typów pojazdów.

Kolejny punkt tego paragrafu 2, w/w przepisu mówi „3. Z przodu pojazdu umieszcza się wyłącznie tablicę jednorzędową, z wyjątkiem ciągnika rolniczego, o którym mowa w ust. 2.”. Dzięki temu systemy rozpoznające przednie tablice mogą być ograniczać się do rozpoznawania tylko tablic jednorzędowych, co jest zadaniem ułatwionym. Ograniczenie to będzie powodować, że ciągniki, które konstrukcyjnie posiadają jedynie tablicę dwurzędową umieszczoną z tyłu, nie będą rozpoznawane. Biorąc pod uwagę stosunek liczby pojazdów tego typu do innych pojazdów poruszających się po drogach, ograniczenie to nie ma znaczącego wpływu na jakość systemu.

Z tyłu pojazdu mogą się znajdować zarówno tablice jednorzędowe jak i dwurzędowe. Niestety żadna z ustaw ani rozporządzeń nie określa położenia przedniej tablicy rejestracyjnej. Ustawa o Warunkach Technicznych Pojazdów precyzyjnie określa jedynie miejsce umieszczenia tylnej tablicy rejestracyjnej, natomiast miejsce umieszczania przedniej tablicy nie jest zdefiniowane.

„§ 1. 2, 4) Wysokość położenia tablicy nad ziemią:

- a) wysokość położenia dolnej krawędzi tablicy nad ziemią nie może być mniejsza niż 0,30 m,
- b) wysokość położenia górnej krawędzi tablicy nad ziemią nie może być większa niż 1,20 m, jeżeli jednak wymóg ten nie może być spełniony w praktyce, wysokość położenia może przekraczać 1,20 m, lecz powinna być tak zbliżona do tego wymagania, jak to jest możliwe ze względu na konstrukcję pojazdu, i nie może w żadnym przypadku przekraczać 2 m;” [22].

Ze względu na to, że położenie tablicy rejestracyjnej względem pojazdu oraz jezdni służyć będzie do korekcji oszacowanej prędkości pojazdu, dlatego w niniejszej pracy sporządzono statystykę położenia przedniej tablicy rejestracyjnej nad poziomem jezdni.

2.3. Rozpoznawanie statyczne i dynamiczne

Systemy automatycznego rozpoznawania tablic rejestracyjnych, ze względu na sposób działania, można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- a) systemy z rozpoznawaniem statycznym
- b) systemy z rozpoznawaniem dynamicznym

W systemach z rozpoznawaniem statycznym, rozpoznanie tablicy rejestracyjnej następuje w ścisłe określonych warunkach. Najczęściej pojazd musi podjechać w przygotowane specjalnie do tego celu miejsce, w którym znajduje się kamera oraz specjalny system oświetlenia, a następnie zatrzymać się i czekać na reakcję systemu. Dzięki temu, że miejsce wykonywania zdjęcia nie zmienia się, a oświetlenie tablicy z niewielkiej odległości łatwo jest zrealizować, w dodatku ze względu na to, że wiadomo, iż w danej chwili na stanowisku stoi tylko jeden samochód, systemy te są stosunkowo proste do realizacji.



Rysunek 5. Wizualizacja bramki w systemie rozpoznawania statycznego. Źródło: <http://www.softart.com.pl/>

Systemy te mają też jednak wiele wad i ograniczeń. Podstawową wadą jest konieczność odpowiedniego ustawnienia pojazdu w określonej pozycji i jego zatrzymania, tak, aby kamera mogła zarejestrować jego tablicę rejestracyjną. Najczęściej, aby pomóc kierowcom właściwie ustawić pojazd, a zarazem wymusić zatrzymanie, stosuje się specjalne bramki (Rysunek 5). Bramka jest na tyle wąska, żeby cały pojazd, niezależnie od położenia względem bramki, zmieścił się w kadrze kamery (zakłada się, że tablica rejestracyjna znajduje się w obszarze obrysu pojazdu). Jednocześnie jest ona na tyle szeroka żeby zmieściły się w niej wszystkie pojazdy

normatywne (określone w ustawie o warunkach technicznych pojazdów [22]). Bramka taka posiada też zaporę, bezpośrednio przed którą kierowca musi zatrzymać pojazd. Bramki takie skutecznie spowalniają ruch, a zwiększenie przepustowości uzyskuje się poprzez dostawianie kolejnych bramek. Z tego powodu bramki stosuje się tylko na wjazdach np. na parkingu lub miejsca chronione.

W przeciwieństwie do systemów statycznych, systemy rozpoznawania dynamicznego projektowane są do pracy w warunkach regularnego ruchu drogowego. W systemach tych najczęściej nie ingeruje się ruch pojazdów i nie stosuje żadnych dodatkowych przyrządów. Tablice rejestracyjne wszystkich przejeżdżających pojazdów rozpoznawane są w czasie rzeczywistym, bez udziału uczestników ruchu, a często też bez ich wiedzy.



Rysunek 6. Wizualizacja systemu rozpoznawania

dynamicznego.

Źródło: <http://www.softart.com.pl/>

Systemy dynamiczne są o wiele bardziej skomplikowane niż systemy statyczne. Przykładowa wizualizacja takiego systemu jest przedstawiona na rysunku 6. Jak widać nie ma tutaj specjalnej bramki, a pojazdy poruszają się tak jak na to pozwalają warunki drogowe. Nie ma tu możliwości precyzyjnego określenia, kiedy i w którym miejscu pojawi się pojazd. Dodatkowo na jednym zdjęciu może się pojawić więcej niż jeden pojazd, a zatem system musi być przygotowany do rozpoznawania wielu tablic na jednym zdjęciu, ale także do sytuacji, gdy żadnych pojazdów na zdjęciu nie ma. Pojazdy na drogach poruszają się (czasem ze znacznymi prędkościami), co powoduje dodatkowe trudności w identyfikacji tablic oraz rozpoznananiu numeru rejestracyjnego. Występuje również szereg innych problemów począwszy od warunków

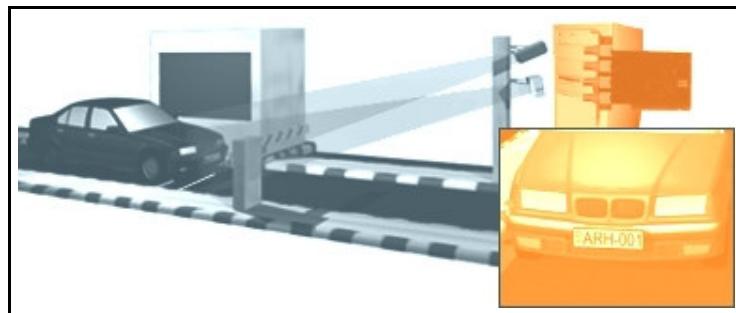
oświetleniowych, poprzez warunki atmosferyczne, a kończąc na możliwościach technicznych wykorzystywanego sprzętu.

2.4. Istniejące systemy ARTR

Na światowym rynku istnieje wiele systemów działających w oparciu o automatyczne rozpoznawanie tablic rejestracyjnych. W większości są to już systemy z rozpoznawaniem dynamicznym, aczkolwiek trudno jest uzyskać informacje na temat dokładności tych systemów w rozpoznawaniu pojazdów w ruchu, dlatego trudno jest określić ich zaawansowanie oraz skuteczność. Najczęściej podawane są jedynie orientacyjne parametry.

Spośród istniejących systemów ARTR, jednym z najpopularniejszych i jednym z lepiej opisanych systemów stosowanych w praktyce, jest moduł CARMEN firmy Adaptive Recognition [1]. Według informacji producenta moduł ten jest regularnie wykorzystywany w różnych systemach w ponad 60 krajach świata, w tym także w Polsce przez firmę IPP (Idea Projekt Produkt). Firma Adaptive Recognition produkuje dwa rodzaje modułów do rozpoznawania tablic rejestracyjnych:

- CARMEN® Parking Engine – moduł do rozpoznawania statycznego. Według informacji producenta, dokładność rozpoznawania jest bliska 100% (brak precyzyjnych informacji). Zdjęcie jest analizowane w czasie ok. 100ms na komputerze z procesorem PIII 2GHz przy zastosowaniu zdjęć o rozdzielczości 768 x 288 pikseli.



Rysunek 7 Schemat bramki w systemie Carmen Parking.

Źródło: Adaptive Recognition
(<http://www.platerecognition.info/1105.htm>)

- CARMEN® FreeFlow Engine – moduł do rozpoznawania dynamicznego. Według informacji producenta, dokładność rozpoznawania wynosi 98,5%, natomiast szybkość analizy jednego zdjęcia wynosi ok. 50ms na

komputerze z procesorem PIII 1GHz przy zastosowaniu zdjęć o rozdzielczości 768 x 288 pikseli.

Jak widać, czas analizy w wersji statycznej jest większy niż w wersji dynamicznej. Może to wynikać z zastosowania dodatkowych operacji poprawiających jakość rozpoznawania, o czym może świadczyć również znacznie większa dokładność systemu statycznego.

Na rynku krajowym wyróżniają się trzy firmy oferujące systemy ARTR: Metasoft, SoftArt oraz ESAPrjekt. Wszystkie trzy firmy oferują systemy umożliwiające pracę dynamiczną.

2.5. Podstawowe etapy rozpoznawania

W ogólności istnieją trzy podstawowe czynności wykonywane podczas rozpoznawania tablic rejestracyjnych [15]:

- a) lokalizacja tablicy rejestracyjnej
- b) wydzielanie znaków
- c) rozpoznawanie znaków

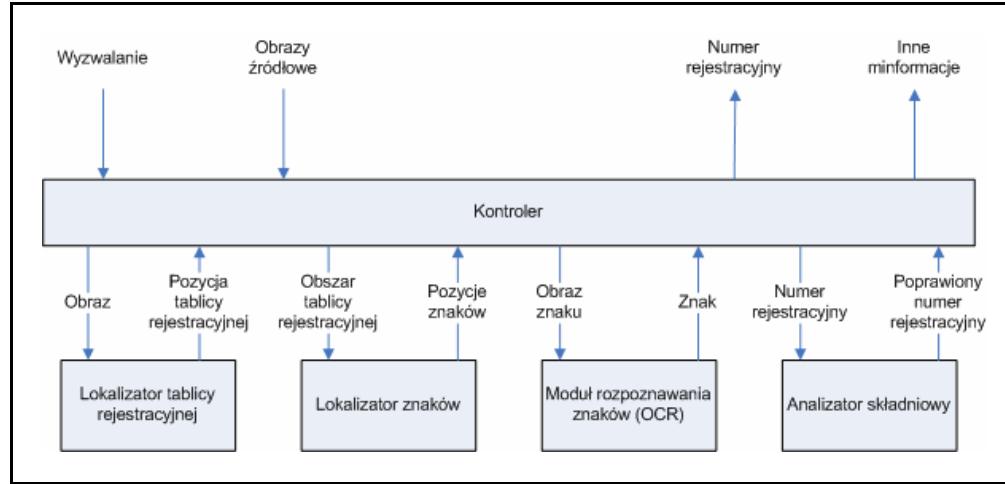
Natomiast biorąc pod uwagę cały system ARTR można ten podział rozwinąć na następujące etapy:

- a) akwizycja obrazu
- b) wstępne przetwarzanie obrazu
- c) lokalizacja tablicy rejestracyjnej
- d) wydzielanie znaków
- e) rozpoznawanie znaków
- f) analiza semantyczna i interpretacja
- g) obróbka i składowanie danych

Diagram funkcjonalny rozpoznawania tablic rejestracyjnych jest przedstawiony na rysunku 8. Główny kontroler zajmuje się kontrolą całego procesu oraz dystrybucją zadań do poszczególnych modułów. Obraz wejściowy jest podawany z zewnętrznego źródła obrazu, a rozpoczęcie rozpoznawania następuje poprzez linię *Wyzwalianie*. Na wyjściu otrzymujemy numer rejestracyjny oraz ewentualnie inne informacje zależnie od konkretnej implementacji oraz zastosowania.

Każdy z bloków zadaniowych pracuje niezależnie i jest wyspecjalizowany w wykonywaniu pewnego jednego zadania, jednak jak można się przekonać, analizując

różne artykuły na ten temat, lepsze efekty osiąga się, gdy bloki te są dobrane pod kątem jak najlepszej współpracy z innymi [3].



Rysunek 8. Diagram funkcyjny systemu Automatycznego Rozpoznawania Tablic Rejestracyjnych. Źródło: [3].

2.6. *Lokalizacja tablicy rejestracyjnej*

2.6.1. Wstęp

Lokalizacja tablicy rejestracyjnej na obrazie jest jednym z najtrudniejszych etapów. Ze względu na to, że wszystkie dalsze operacje prowadzone są na wyznaczonym obszarze obrazu, prawidłowe wyznaczenie pozycji tablicy rejestracyjnej ma kluczowe znaczenie w całym procesie działania systemu.

Najczęściej stosuje się kilkustopniowe metody lokalizacji tablic rejestracyjnych. W pierwszym etapie wyszukuje się jedynie obszary potencjalnie zawierające tablice (obszary kandydujące). Dopiero w kolejnych etapach rozpoznawania stwierdza się ostatecznie, czy w danym regionie wystąpiła jakaś tablica. Drugi etap często nie jest wyraźnie wyodrębniony, ostateczną decyzję podejmuje się w przypadku, gdy rozpoznanie dało pozytywny efekt. W innych przypadkach stwierdza się, że w analizowanym obszarze tablicy nie ma.

Podobnie jak wielu podobnych zadaniach klasyfikacyjnych wśród wskaźników skuteczności metod lokalizacyjnych można wyróżnić:

- współczynnik błędnej akceptacji
- współczynnik błędного odrzucenia

W przypadku systemu z kilkustopniowym algorytmem rozpoznawania tablic wraz z analizą semantyczną, wydaje się być sensownym, aby współczynnik błędnego odrzucenia był w pierwszym etapie możliwie jak najmniejszy, nawet kosztem zwiększenia współczynnika błędnej akceptacji. Można bowiem przypuszczać, że obszary błędnie określone jako potencjalnie zawierające tablicę rejestracyjną, zostaną w większości odrzucone na dalszych etapach rozpoznawania. Z drugiej strony, nadmierne zwiększanie współczynnika błędnej akceptacji powoduje, że algorytm lokalizacyjny może stwierdzić, iż większość obrazu potencjalnie zawiera tablicę rejestracyjną, co może nie tylko wydłużyć czas analizy, ale także uniemożliwić taką analizę w rozsądny czasie.

2.6.2. Znane algorytmy lokalizacji tablic rejestracyjnych

Obecnie w dostępnej literaturze spotyka się wiele różnych technik lokalizacji tablic rejestracyjnych. Czasem łączy się kilka technik, aby uzyskać lepsze wyniki. Wśród wykorzystywanych technik można wyróżnić takie jak:

- a) wykrywanie krawędzi
- b) metody morfologiczne
- c) wykorzystanie sieci neuronowych
- d) kwantyzacja wektorowa
- e) metoda „fuzzy maps”
- f) analiza kolorystyczna

Z uwagi na to, że tablice rejestracyjne w większości krajów składają się z dwóch kontrastowych kolorów (najczęściej biały i czarny), dlatego najczęściej wykorzystuje się metody korzystające z wykrywania krawędzi, czyli miejsc o dużym kontraście.

2.6.3. Lokalizacja tablic przy użyciu tzw. sygnatur

Po raz pierwszy technika lokalizacji tablic rejestracyjnych na podstawie tzw. sygnatury została opisana w 1997 r. w artykule [3]. Ze względu na słabe wyniki osiągane przy pomocy wykorzystywanej do tej pory analizy kształtów na obrazie, rozpoczęto poszukiwania wydajniejszych algorytmów. Opracowano nową technikę, która bazuje na tym, że w liniach przebiegających przez tablicę rejestracyjną na obrazie pojawiają się charakterystyczne zmiany jasności, nazwane tutaj *sygnaturami*.

Sygnatura taka pojawia się na wykresie profilu jasności w linii przebiegającej równolegle (lub prawie równolegle) do kierunku ułożenia liter na tablicy. Przykładowe profile jasności przedstawione są na rysunku 9. W lewej jego części widoczne jest zdjęcie pojazdu, na którym czerwonym kolorem zaznaczone są linie, w których dokonano wyznaczenia profilu jasności. Profile te przedstawione są w prawej części obrazu na wysokości odpowiadającej tym liniom.



Rysunek 9. Profile jasności w liniach poziomych. Na jednym z profili pojawia się sygnatura tablicy rejestracyjnej.

Można bez trudu zauważyc, że w profilu jasności odpowiadającemu linii przebiegającej przez tablicę rejestracyjną pojawiają się charakterystyczne częste zmiany jasności (miejsce zaznaczone czerwoną obwiednią na rysunku 9). Miejsce te zwane jest właśnie *sygnaturą* tablicy rejestracyjnej. Miejsca takie wykrywa się na podstawie analizy częstości, regularności oraz amplitudy zmian jasności. Wartości wzorcowe tych parametrów uzyskuje się statystycznie, badając sygnatury obrazów wielu różnych tablic rejestracyjnych.

Profil jasności obrazu w wierszu j , jest tablicą jasności poszczególnych pikseli w tym wierszu:

$$P_j[i] = f(i, j), \text{ dla } i=0,1,2,\dots,W.$$

gdzie: P_j – profil jasności w linii na wysokości j -tego wiersza; i – numer kolumny; j – numer wiersza; W – szerokość obrazu.

Ze względu na pojawiający się na obrazach szum, lepiej jest liczyć profile jasności w liniach o „grubości” większej od jednego piksela. Algorytm nazywa się wtedy rzutem (projekcją lub też kumulacją) i jest też wykorzystywany w dalszych procesach rozpoznawania tablic. Algorytm rzutu przyjmuje postać:

$$P_j[i] = \sum_{k=0}^H f(i, j+k) \text{ dla } i=0,1,2,\dots,W$$

gdzie: P_j – profil jasności na wysokości j -tego wiersza; i – numer kolumny, j – numer wiersza początkowego; H – liczba wierszy.

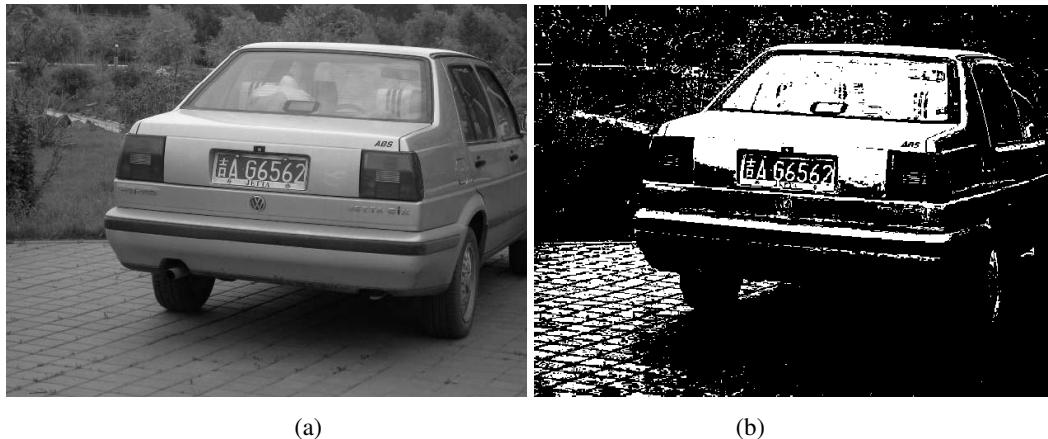
Zastosowanie wyszukiwania sygnatur do lokalizacji tablic rejestracyjnych pozwoliło na kilkukrotne przyśpieszenie obliczeń. W zależności od złożoności obrazu, proces lokalizacji trwa od 50 do 100 ms.

2.6.4. Lokalizacja tablic przy użyciu analizy teksturalnej

Lokalizacja tablic rejestracyjnych przy użyciu analizy teksturalnej została zaproponowana w pracy [15]. Proponowany algorytm korzysta ze strategii „bottom-up”, która polega na łączeniu pojedynczych elementów, a następnie systematycznym ich łączeniu w większe grupy. Tutaj grupuje się miejsca o podobnej złożoności obrazu. Zbudowany na tej podstawie algorytm umożliwia segmentację nawet bardzo złożonych obrazów. Algorytm również dobrze sobie radzi z szumem, nie potrzebne jest dodatkowe usuwanie szumu przed analizą.

Etap 1. Przetwarzanie wstępne.

Pierwszym krokiem, podobnie jak w wielu innych algorytmach, jest przetwarzanie wstępne. Obrazek jest przekształcany na postać szarościową, a następnie wykonywane jest wyrównywanie histogramu, tak, aby uzyskać wyższy kontrast. W przeciwieństwie do innych algorytmów, nie wymagane jest usuwanie szumów. Obrazek po przetwarzaniu wstępny przedstawiony jest na rysunku 10a.



Rysunek 10. Obraz oryginalny w odcieniach szarości (a) oraz obraz po wstępny progowaniu (b). Źródło: [15].

Etap 2. Binaryzacja.

Kolejnym etapem jest binaryzacja (progowanie). Jest to bardzo ważny etap, ponieważ wszystkie późniejsze operacje bazują na otrzymanym na tym etapie obrazie. Algorytm musi być wystarczająco elastyczny, tak, aby poradzić sobie z obrazami wykonanymi w różnych warunkach oświetleniowych. Progowanie jest wykonywane jest metodą Otsu [18], w której próg jest wyliczany globalnie dla całego obrazu na podstawie histogramu obrazu szarościowego. Rezultat binaryzacji przedstawiony jest na rysunku 10b.

Optymalny próg w metodzie Otsu wyliczany jest na podstawie wzoru:

$$T = \arg \max_T (\omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2)$$

gdzie: ω_0 jest znormalizowaną liczebnością klasy 0 (np. liczbą punktów pewnej klasy podzieloną przez liczbę punktów obrazu), ω_1 jest znormalizowaną liczebnością klasy 1, μ_1 i μ_0 są średnimi wartościami jasności punktów w danej klasie.

Etap 3. Skanowanie linii obrazu

Po tych operacjach następuje wstępne wyszukiwanie obszarów, które mogą zawierać tablice. Algorytm ten bazuje na analizie cech teksturalnych obrazu. Początkowo obraz analizowany jest linia po linii w celu wyszukania miejsc, w których dochodzi do częstych zmian jasności. Następnie miejsca te są łączone w większe grupy, które w ostateczności określają obszary potencjalnie zawierające tablice rejestracyjne. W dalszej kolejności każdy z tych obszarów jest weryfikowany odpowiednią metodą klasyfikacyjną, która określa czy dany region zwiera tablicę, czy nie.

Pierwszym etapem analizy teksturalnej jest skanowanie obrazu linia po linii, w celu wykrycia miejsc o dużej liczbie przejść jasności. W wyniku binaryzacji, każdy piksel obrazu jest reprezentowany przez liczbę 1 lub 0 (umownie). Algorytm skanujący linie działa następująco:

Krok 1. Dla całego obrazu wejściowego o wymiarach $w \times h$, wyrażonego funkcją $f(x, y)$, liczona jest suma przejść jasności w danych liniach C_{sum} . Sumy są liczone dla linii o zadanej szerokości W_s .

For $j=1:h-1$

For $i=1:w-W_s-1$

$$C_{sum} = \sum_{k=i}^{i+W_s} |f(k, j) - f(k + 1, j)|$$

Krok 2. W przypadku, gdy C_{sum} przekracza pewien ustalony próg C , dla danej linii ustawiana jest flaga $Tag[i]=1$, w przeciwnym wypadku $Tag[i]=0$, gdzie i jest numerem linii.

Krok 3. Liczona jest suma flag $Tag[i]$ w pionie w pewnym ustalonym zakresie m do n , zgodnie z formułą:

For $k=1:h-1$

$$\text{Jeżeli } Tag[k]=1 \text{ i } k \in [m,n], \text{ to } L_{sum} = \sum_{k=m}^n Tag[k]$$

Krok 4. Jeżeli suma flag L_{sum} w zadanym zakresie jest większa od pewnego ustalonego progu L , to obszar pomiędzy aktualną linią i , a linią L_{sum} linii powyżej (czyli $i-L_{sum}$) staje się strefą potencjalnie zawierającą tablicę rejestracyjną (obszarem kandydującym). Zapamiętywane są dwie tablice wartości, górnego (Y_t) i dolnego (Y_b) położenia strefy:

$$Y_t[q] = i$$

$$Y_b[q] = i - L_{sum}$$

gdzie: $q = 1, 2, \dots$ jest numerem kolejnej wykrytej strefy.

Zastosowanie powyższego algorytmu do obrazu 10b daje w wyniku dwie strefy potencjalnie zawierające tablice. Strefy te przedstawione są na rysunku 11.



Rysunek 11. Strefy potencjalnie zawierające tablice rejestracyjne. Źródło: [15].



Rysunek 12. Strefy kandydujące poddane wykrywaniu krawędzi. Źródło: [15].

Etap 4. Wykrywanie krawędzi.

Obszary potencjalnie zawierające tablicę rejestracyjną (Rysunek 11) będą zawsze miały podobną strukturę do obszaru z tablicą rejestracyjną. Mogą to być obszary zawierające zarówno litery na bilbordach, napisy na pojazdach, ale także fragmenty

pojazdów, drzewa, płoty. Liczba przejść jasności w tych obszarach może być bardzo podobna do liczby przejść w obszarze zawierającym tablicę, jednak w przeciwieństwie do tablic, rzadziej zawierają ostre kontury. W tym wypadku stosowane jest wyszukiwanie krawędzi.

Do wyszukiwania krawędzi stosowany jest operator *canny*. W obszarach tablic rejestracyjnych kontury te będą wyraźne, natomiast w innych obszarach kontury mogą być nieregularne oraz będzie ich mniej (Rysunek 12).

Etap 5. Wyznaczanie tablic przejść jasności.

Bazując na spostrzeżeniu, że w obszarze tablicy rejestracyjnej występują częste przejścia jasności, lewą i prawą granicę tablicy rejestracyjnej można wyznaczyć badając gęstość tych przejść. Buduje się zatem tablice przejść jasności dla obszarów kandydujących.

Krok 1. Wybiera się środkową linię kandydującego obszaru:

$$i = \frac{(H + 1)}{2}$$

gdzie: i – numer linii, H – wysokość obszaru.

Krok 2. Wyznaczanie tablic przejść jasności:

$$WB[i] = |f(i, j) - f(i, j + 1)|$$

gdzie: $f(i, j)$ – wartość piksela w punkcie (x, y) ; $j=1, 2, \dots, W$ – numer kolumny; W – szerokość obszaru. Jeżeli $WB[i]=1$, to wstawia się numer kolumny j do tablicy C , czyli: $C[k]=j$, gdzie k jest kolejnym indeksem w tej tablicy.

Krok 3. Wyznaczanie odległości między kolejnymi kolumnami wyznaczonymi w poprzednim kroku, czyli właściwie wyznaczenie różnicy między kolejnymi wartościami tablicy C .

$$D[k] = C[k + 1] - C[k]$$

gdzie: $D[k]$ jest tablicą odległości; $k=1, 2, \dots, n-1$; n – liczba elementów tablicy C .

Etap 6. Wyznaczanie prawej i lewej granicy tablicy rejestracyjnej

Krok 1. Elementy tablicy D zawierają odległości między kolejnymi przejściami jasności. Przejścia te w obrębie tablicy pojawiają się często, natomiast poza tablicą rzadko. Zakłada się pewną maksymalną odległość H_p , która może się pojawić pomiędzy przejściami w obszarze tablicy rejestracyjnej. Teraz iteruje się po kolejnych elementach

tablicy odległości D . Jeżeli odległość jest mniejsza niż zadane H_p , wtedy dodaje się pozycję przejścia z tablicy C do nowej tablicy S_i . Jeżeli natomiast element jest mniejszy niż H_p , wtedy tworzy się nową tablicę S_i (czyli zwiększa się i). W ten sposób otrzymuje się zestawy tablic S , z których każda zawiera sąsiadujące ze sobą przejścia, odległe od siebie nie więcej niż o odległość H_p . Algorytm ten można zapisać symbolicznie w postaci:

For $k=1:n-1$

If $D[k] < H_p$,

$C[k], C[k+1] \in S_i$

else

$i=i+1$

Krok 2. Jeżeli liczba elementów w tablicy S_i (czyli liczba kolejnych przejść jasności odległych od siebie nie więcej niż o H_p), jest większa niż pewien zdefiniowany eksperymentalnie próg $T_{changes}$, wtedy przyjmuje się że najmniejszy element z tej tablicy określa lewą granicę tablicy, a największy element, prawą granicę.

Etap 7. Klasyfikacja wyznaczonego obszaru

W większości przypadków powyższy algorytm daje w wyniku tylko jeden obszar zawierający tablicę, jednak mogą się zdarzyć przypadki, gdy więcej niż jeden obszar zostanie zaakceptowany (Rysunek 13). W takim wypadku niezbędna jest jeszcze klasyfikacja obszaru.



Rysunek 13. Wykryte obszary tablic rejestracyjnych.
Źródło: [15].

Proponowane są dwie metody klasyfikacyjne w zależności od wielkości obszaru tablicy. Dla małych tablic stosowane są metody weryfikacji pewnych właściwości, takich jak długość W , szerokość H , lub też częściej: proporcje $R=W/H$, oraz obszar $A=W \times H$.

W przypadku dużych obszarów stosowana jest również analiza statystyczna. Jeżeli przyjąć, że liczba N oznacza liczbę pikseli należących do liter rejestracji, to

$D=N/A$, będzie stosunkiem pola liter do pola tablicy. Wykonując odpowiednie badania, można statystycznie określić w jakim zakresie powinna znajdować się wartość D .

Rezultaty

Autorzy algorytmu przetestowali go na 380 rzeczywistych obrazach RGB o rozmiarze 640x480. Poza badanym pojazdem, na obrazach w tle pojawiali się ludzie, inne pojazdy, budynki, drzewa, itp. Spośród tych obrazów, algorytm nie poradził sobie ze zlokalizowaniem 15 tablic. Wynika z tego, że 96,1% tablic zostało zlokalizowanych poprawnie. Głównymi przyczynami błędów były: 1) istnienie innych obszarów z napisami; 2) niski kontrast tablicy rejestracyjnej.

Czas przetwarzania (łącznie z późniejszą segmentacją i rozpoznawaniem znaków wynosi ok. 0,2 sekundy na komputerze z procesorem P4 2400MHz.

2.6.5. Lokalizacja tablic przy użyciu operacji morfologicznych

W wielu artykułach dotyczących automatycznego rozpoznawania tablic, proponowane jest wykorzystanie operacji morfologicznych, głównie ze względu na ich elastyczność, oraz małą wrażliwość na zakłócenia. Wynika to również ze specyfiki samych tablic, które składają się kontrastowych kształtów (znaków) na jednolitym tle, a zatem są bardziej „czułe” na przekształcenia morfologiczne niż tło o małym kontraście, zatem łatwo jest je wydzielić, przy pomocy tych metod.

„Operatory morfologiczne stosuje się do uwypuklenia lub schowania ciemniejszych pikseli (ciemny - 0; jasny - 1). Operator erozji jako wynik dla obrazów binarnych zwraca iloczyn logiczny wartości danego piksela i jego otoczenia. Zaś operator dylacji dla obrazów binarnych zwraca sumę logiczną wartości danego piksela i jego otoczenia. Otoczenie jest najczęściej 8-styczne. Uogólnieniem operatorów morfologicznych dla obrazów wielowartosciowych (np. w stopniach szarości) są odpowiednio minimum i maksimum piksela i jego otoczenia. Dla obrazów kolorowych można brać odpowiednio minimum lub maksimum dla każdej składowej koloru. Operator erozji będzie więc prowadzić do rozrostu obszarów ciemniejszych (reprezentowanych najjaśniejszymi kolorami pikseli), zaś operator dylacji do rozrostu obszarów jaśniejszych (wyższe wartości pikseli). Połączenie działania obu operatorów w kolejności erozja-dylacja daje operację *otwarcia* a w kolejności dylacja-erozja –

domknięcia. Operacje te można stosować w celu pozbycia się drobnych plamek (szumu na ekranie), które byłyby niepotrzebnym obciążeniem dla algorytmu segmentacji.” [7]

Opisany w artykule [14] algorytm przedstawiony jest poniżej.

Krok 1. Poprawa kontrastu.

Teoretycznie, najwyższy możliwy kontrast występuje między kolorem czarnym a białym, czyli tak jak na przykład w przypadku liter polskich tablic rejestracyjnych (zarówno starszego jak i nowego typu). Jednak ze względu na różne warunki oświetleniowe oraz inne czynniki, takie jak na przykład zabrudzenie tablicy, elementy białe tablicy na zdjęciu rzadko posiadają najwyższą jasność, a elementy czarne rzadko mają najniższą jasność.

Aby poprawić kontrast obrazu, a co za tym idzie, kontrast liter na tablicy rejestracyjnej, stosuje się operację BTH (*ang. Black Top Hat*). Jej rozmiar ustalono eksperymentalnie na połowę wysokości liter tablicy $h/2$. Obraz oryginalny i obraz po operacji BTH przedstawiono na rysunkach odpowiednio 14a i 14b.



(a)

(b)

Rysunek 14. (a) Obraz oryginalny; (b) Obraz poddany przetwarzaniu wtępnemu. Źródło: [14].

Krok 2. Likwidacja tła

Drugi krok polega na usunięciu nieprzydatnych do dalszej analizy fragmentów obrazu. Osiągnięto to poprzez połączenie metod BTH i WTH (*ang. White Top Hat*). Pierwsza z tych operacji wykrywa tablice z czarnymi znakami na białym tle, natomiast druga, białe znaki na czarnym tle. Ponieważ nie wiadomo jakiego typu tablica może się pojawić na obrazie, konieczne jest zastosowanie obu tych metod, a następnie odpowiednie połączenie wyników. Aby znaki tablicy rejestracyjnej były wyraźne,

niezbędne jest również zastosowanie dodatkowej operacji – rekonstrukcji. Wynik przedstawiony jest na rysunku 15a.



Rysunek 15. Obraz po likwidacji tła (a) etap I ; (b) etap II.

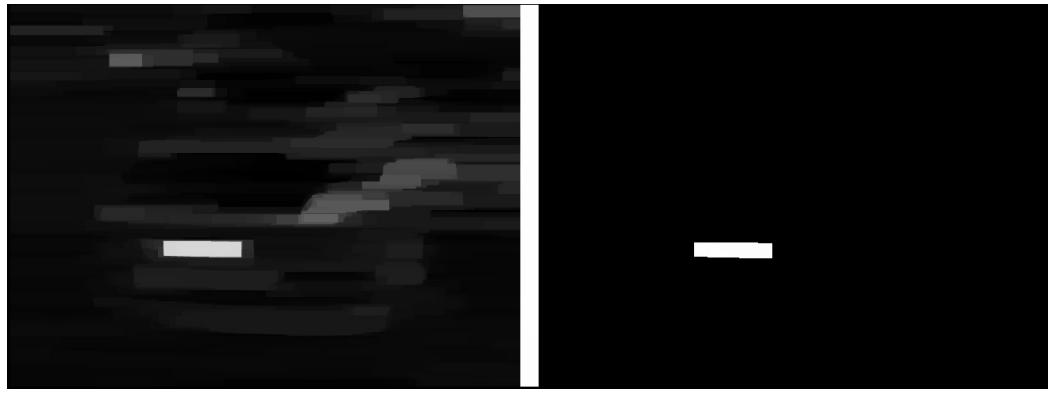
Źródło: [14].

Krok 3. Detekcja obszaru tablicy

Wynik otrzymany w poprzednim kroku zawiera poza literami tablicy rejestracyjnej, również inne elementy obrazu. Z uwagi na to że główne osie tablicy rejestracyjnej na wykonanych zdjęciach są równoległe do osi obrazu, wykorzystano filtr kierunkowy. Ponieważ litery tablicy ułożone są w poziomie, jedna obok drugiej, dlatego wykorzystano operację otwarcia o rozmiarze $4h$ w kierunku poziomym, tak, aby uzyskać połączenie obszarów liter w jeden spójny i wyraźny obszar (Rysunek 15b).

Kolejnym krokiem była dalsza eliminacja obszarów które nie mogą być tablicami rejestracyjnymi. Tym razem wykonano dwa otwarcia, w kierunku pionowym (rozmiar $h/2$), aby usunąć obszary niższe niż tablice, a następnie znów w kierunku poziomym (rozmiar $2h$). Po tych operacjach obraz przedstawia się tak jak na rysunku 16a.

Obraz wynikowy nadal zawiera pewne jasne obszary poza obszrem tablicy, jednak można zauważyć, że obszar tablicy jest wyraźnie od nich jaśniejszy. Zastosowano więc podwójne progowanie, które pozwoliło wyodrębnić jedynie obszar tablicy rejestracyjnej.



(a)

(b)

Rysunek 16. Obraz po likwidacji tła (a) etap III; (b) etap IV – ostateczna binaryzacja. Źródło: [14].

Ostatecznie wykryty obszar tablicy rejestracyjnej pokazano na rysunku 17. Jest on powiększony o pewien margines, tak, aby mieć pewność, że żadna część tablicy nie została pominięta.



Rysunek 17. Wyznaczony obszar tablicy rejestracyjnej.
Źródło: [14].

Rezultaty.

Autor opisanego powyżej algorytmu morfologicznego przetestował go na 45 naturalnych obrazach w różnych warunkach oświetleniowych. Rozmiar obrazów to 648x486. Algorytm wykrywał poprawnie wszystkie tablice rejestracyjne. Czas przetwarzania na komputerze wyposażonym w procesor klasy Pentium III wynosił ok. 1 sekundy.

2.7. Segmentacja znaków

2.7.1. Wstęp

Gdy już tablica rejestracyjna zostanie zlokalizowana, kolejnym etapem jest wydzielenie znaków na wyznaczonym obszarze. Jako że nie ma gwarancji że wyznaczony obszar zawiera tablicę rejestracyjną, moduł segmentacji znaków powinien przewidywać możliwość odrzucenia obszaru który nie zawiera tablicy rejestracyjnej. W ogólności istnieją dwa główne algorytmy segmentacji znaków:

- wykorzystanie rzutu jasności ([15], [3], [12], [21])
- metoda elementów połączonych ([24], [5], [4], [17])

Sporadycznie pojawiały się próby wykorzystywania innych technik, takich jak: metody morfologiczne [20] oraz etykietowanie relaksacyjne [5]. Wszystkie algorytmy mają swoje wady i zalety. W przypadku wykorzystania rzutu jasności, tablice rejestracyjne muszą być równoległe do krawędzi obrazu, metoda elementów połączonych wymaga, aby znaki tablicy były wyraźnie odseparowane od siebie i od otoczenia, natomiast metoda morfologiczna wymaga znajomości wymiarów tablicy na obrazie.

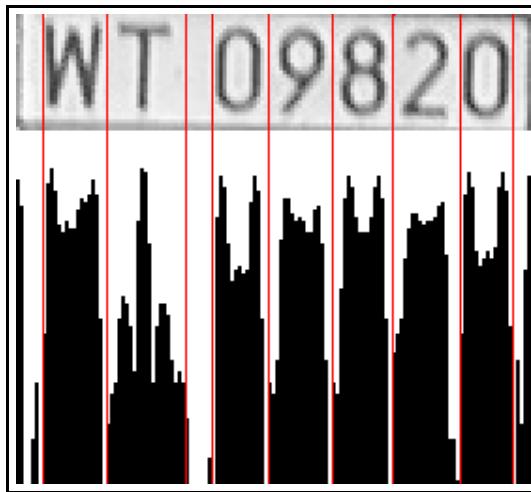
2.7.2. Segmentacja znaków przy użyciu rzutu jasności

Algorytm rzutu jasności był już opisany w rozdziale 2.6.3 przy okazji omawiania *sygnatur*. W przypadku wykorzystania tego algorytmu do segmentacji znaków wykonuje się rzut jasności dla całego obszaru potencjalnie zawierającego tablicę. Algorytm polega więc na wyliczeniu sumy jasności pikseli w poszczególnych kolumnach i może być wyrażony wzorem:

$$P[i] = \sum_{j=0}^h f(i, j) \text{ dla } i=0,1,2,\dots,w$$

gdzie: P – rzut jasności (tablica); i – numer kolumny, w – szerokość obszaru; h – wysokość obszaru.

Przykładowy wynik działania algorytmu rzutu jasności przedstawiony jest na rysunku 18. W górnej części ilustracji przedstawiona jest analizowana tablica. W dolnej części przedstawiony jest rzut jasności w liniach pionowych. Wykres rzutu jasności jest odwrócony w taki sposób, że im wyższa wartość na wykresie, tym więcej ciemnych pikseli występuje w danej kolumnie.



Rysunek 18. Przykładowy wynik algorytmu rzutu jasności

Jak widać, w miejscach gdzie występują litery, wykres wzrasta się, natomiast w miejscach gdzie występują przerwy między znakami, na wykresie rzutu jasności pojawiają się „doliny”. Na tej podstawie można wyznaczyć granice znaków – zaznaczone są one na powyższym wykresie czerwonymi liniami. Granice te wyznacza się najczęściej wyszukując „doliny” wykresu oraz analizując odległości między nimi.

Pokazany powyżej przykład, jest przypadkiem idealnym, kiedy to granice tablicy rejestracyjnej zostały wyznaczone z dużą dokładnością. W praktyce, takie przypadki zdarzają się bardzo rzadko. Najczęściej, na skutek możliwego niedoszacowania wielkości obszaru przez algorytm lokalizacyjny, zlokalizowane obszary są dodatkowo powiększane, tak aby uniknąć ucięcia tablicy w przypadku gdy takie niedoszacowanie będzie mieć miejsce. W takim przypadku nie jest możliwe bezpośrednie zastosowanie rzutu jasności, ponieważ na wyznaczonym obszarze mogą się pojawić inne elementy pojazdu które zniekształcają rzut jasności. Stosuje się więc dodatkowe metody wyznaczające dokładne położenie znaków tablicy. Najczęściej wykorzystuje się tu również metodę rzutu jasności, choć stosowane są też inne metody, np. wykrywanie długich poziomych krawędzi jako obramowania tablicy [15].

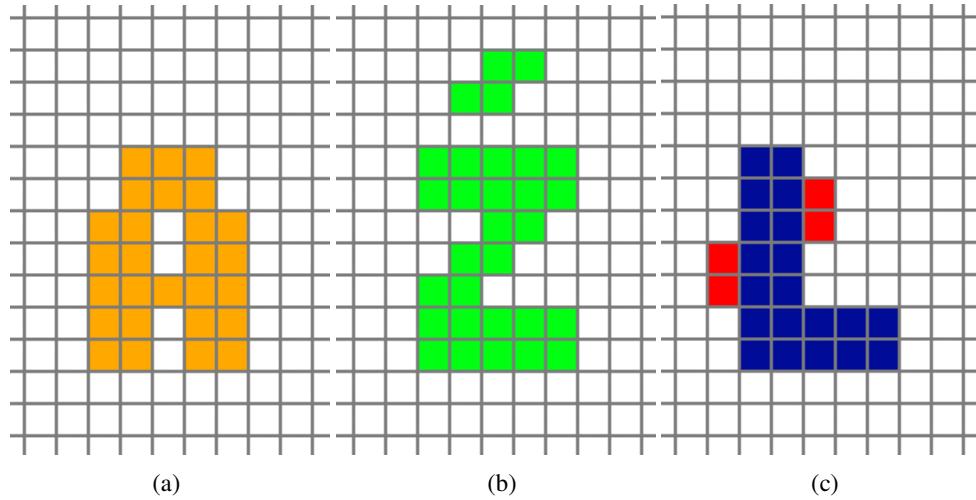
W pierwszej kolejności wykonuje się przeważnie wyznaczanie granic pionowych. Można zauważyć, że w przeważającej liczbie obrazów tablic rejestracyjnych, nad znakami występuje obszar o jednolitym tle. Obszar ten powinien być wyraźnie widoczny na poziomym rzucie, jako gwałtowna zmiana jasności. Obraz jest kadrowany w tym miejscu, a następnie wykonywana jest analiza poziomego rzutu jasności, tak jak to zostało opisane na początku tego punktu. Mimo prostej zasady, nie

jest to zadanie trywialne i występuje wiele problemów trudnych do rozwiązania. Próbu zastosowania tej metody opisane zostały w rozdziale .

2.7.3. Segmentacja znaków przy użyciu elementów połączonych

Metody elementów połączonych (ang. connected components) są grupą metod, których działanie opiera się na operowaniu na pewnych spójnych obszarach, składających się z elementów sąsiadujących ze sobą, oraz posiadających jakąś wspólną cechę (np. kolor). Przykładem takiego obszaru może być litera tablicy rejestracyjnej, która składa się z sąsiadujących ze sobą pikseli (elementów), których wspólną cechą jest kolor różny od koloru tła. Segmentacja tą metodą odbywa się najczęściej na obrazach 1-bitowych. Obrazy zawierające kolor przekształcane są na postać szarościową, następnie progowane, a dopiero później poddawane segmentacji [7].

„Pod pojęciem <>spójny obszar<> należy rozumieć taki zbiór pikseli obrazu o jednakowej wartości (jasności, kolorze, indeksie – zależnie od interpretacji), w którym dwa dowolne piksele można połączyć linią łamana niewychodzącą poza tenże zbiór.” [7] Na rysunku 19 przedstawiono przykłady różnych obszarów reprezentowanych przez kształty liter. Rysunek 19a przedstawia obszar litery A będący obszarem spójnym, ponieważ wszystkie piksele sąsiadują ze sobą i mają ten sam kolor. Rysunek 19b przedstawia obszar litery Ž i jest obszarem niespójnym, ponieważ niektóre piksele są odłączone od pozostałych. Rysunek 19c przedstawia obszar litery Ł, który jest również obszarem niespójnym, ponieważ kolor pewnych pikseli należących do obszaru litery jest różnych od pozostałych. Przedstawiona spójność jest pojęciem umownym, ponieważ można uznać, że kształt litery Ž na rysunku 19b przedstawia dwa obszary spójne, natomiast obszar litery Ł na rysunku 19c zawiera 3 obszary spójne.



Rysunek 19. Przykład obszaru: (a) spójnego; (b) niespójnego – nie wszystkie piksele są połączone; (c) niespójnego – nie wszystkie piksele mają te same cechy (kolor).

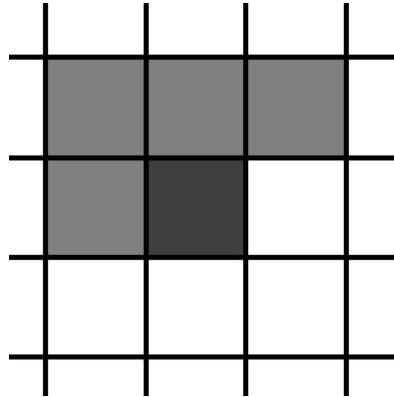
Istnieje wiele algorytmów segmentacji, a najpopularniejsze wykorzystują metody dziel-i-łącz, metody powodziowe lub analizę otoczenia piksela [7].

Metoda dziel-i-łącz polega na tak długim dzieleniu obszaru wejściowego na podobszary, aż każdy z podobszarów będzie zawierał jedynie piksele o takiej samej wartości. Następnie przylegające do siebie podobszary o takich samych wartościach pikseli są łączone w jednolity obszar do momentu, gdy nie można więcej połączyć ze sobą żadnych podobszarów. Tak otrzymane obszary są obszarami spójnymi. Wadą tego algorytmu jest konieczność wielokrotnego odwoływanego się do wartości pikseli, co bardzo spowalnia jego pracę.

Metoda powodziowa polega na skanowaniu kolejnych pikseli obrazu i w przypadku, gdy kolejny analizowany piksel nie został jeszcze zaklasyfikowany do żadnego ze znanych już obszarów, nadawany jest mu unikalny numer (etykieta). Ten sam numer nadawany jest sąsiadom tego piksela, a następnie sąsiadom sąsiadów, itd. W ten sposób piksele o tej samej wartości są niejako „zalewane” (stąd nazwa algorytmu). Niestety w najprostszej wersji algorytmu rekurencyjnie etykietowanie pikseli-sąsiadów powoduje, że dość szybko dochodzi do przepełnienia stosu [7].

Inną metodą opisaną w pracy [7] jest metoda analizy otoczenia do etykietowania pikseli. W przeciwieństwie do metody powodziowej, nie wymaga ona stosowania rekurencji, a proces analizy przeprowadzany jest sekwencyjnie. Dzięki temu zachowano kompromis pomiędzy szybkością, a ograniczeniami pamięci (stosu). Algorytm ten polega na analizowaniu danego piksela w kontekście jego otoczenia, które składa się

jedynie z przeanalizowanych już wcześniej pikseli (operator zdefiniowany jest na Rysunku 20).

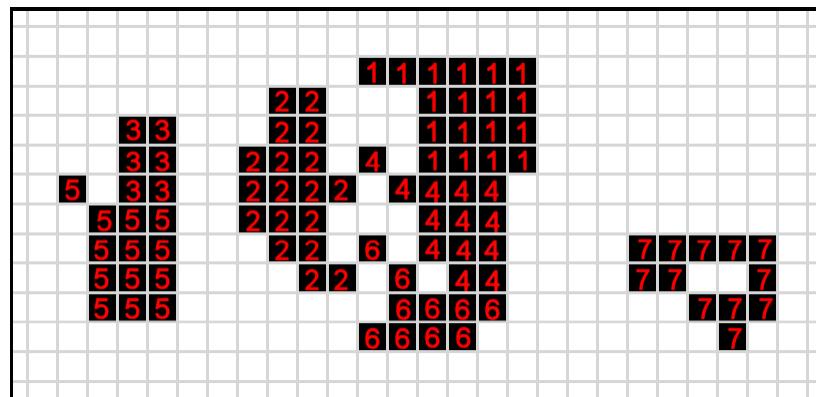


Rysunek 20. Otoczenie badanego piksela (najciemniejsze pole) w algorytmie analizy otoczenia przy skanowaniu od lewej do prawej strony, z góry do dołu. Źródło: [7].

Etykieta nadawana jest wg następującego algorytmu:

- jeżeli w otoczeniu piksela nie ma pikseli z etykietą (czyli różnych od tła), wtedy przypisz pikselowi nową etykietę, w przeciwnym wypadku:
- jeżeli w otoczeniu piksela znajdują się jeden lub więcej pikseli (różnych od tła) o jednakowych etykietach, to przypisz analizowanemu pikselowi identyczną etykietę, w przeciwnym przypadku:
- w otoczeniu piksela znajdują się piksele o różnych etykietach, przypisz analizowanemu pikselowi jedną z tych etykiet i zapamiętaj że wszystkie etykiety w tym otoczeniu są równoważne.

W wyniku działania opisanego powyżej algorytmu każdy piksel różny od tła otrzymuje swoją etykietę (Rysunek 21). Widać jednak, że niektóre spójne obszary otrzymały kilka etykiet.



Rysunek 21. Problem unifikacji etykiet. Trzem spójnym obszarom przypisano w sumie 7 etykiet. Źródło: [7].

Aby zlikwidować ten problem stosuje się unifikację etykiet na podstawie zapamiętanych wcześniej danych o etykietach równoważnych. Jednak nawet na przykładzie tak prostego obrazu jak na rysunku 21, widać że liczba etykiet otrzymanych w pierwszej fazie działania algorytmu rośnie niewspółmiernie do liczby spójnych obszarów, dlatego macierz równoważności etykiet potrafi się bardzo szybko rozrosnąć do olbrzymich rozmiarów, w dodatku większość elementów tej macierzy będzie miała wartość zerową. Takie macierze nazywa się macierzami rzadkimi (rys. 22a) i ich przetwarzanie jest bardzo czasochłonne. Z tego względu, zamiast przechowywać pełną macierz, stosuje się macierze skrócone (rys. 22b) w których w każdym wierszu odpowiadającym kolejnym etykietom, przechowywane są jedynie etykiety do nich równoważne.

a)	1	2	3	4	5	6	7	b)	c)
	1	0	0	0	1	0	0	0	1 4
	2	0	0	0	1	0	1	0	2 4 6
	3	0	0	0	0	1	0	0	3 5
	4	1	1	0	0	0	1	0	4 1 2 6
	5	0	0	1	0	0	0	0	5 3
	6	0	1	0	1	0	0	0	6 2 4
	7	0	0	0	0	0	0	0	7

Rysunek 22. Macierze równoważności etykiet dla obrazu z rysunku 21; (a) macierz binarna; (b) macierz skrócona; (c) macierz skrócona po unifikacji. Źródło: [7].

Na rysunku 22c przedstawiono ostateczny wynik po unifikacji. W każdym wierszu odpowiadającym kolejnym etykietom znajdują się wszystkie inne równoważne im etykiety. W tym przypadku otrzymano trzy grupy etykiet (pierwsza: 1, 2, 4, 6; druga: 3, 5; trzecia: 7) odpowiadające trzem obszarom spójnym z rysunku 21.

2.8. Rozpoznawanie znaków

2.8.1. Wstęp

W wyniku segmentacji znaków tablicy rejestracyjnej otrzymuje się obszary zawierające pojedyncze znaki. Kolejnym etapem rozpoznawania jest rozpoznawanie tych znaków.

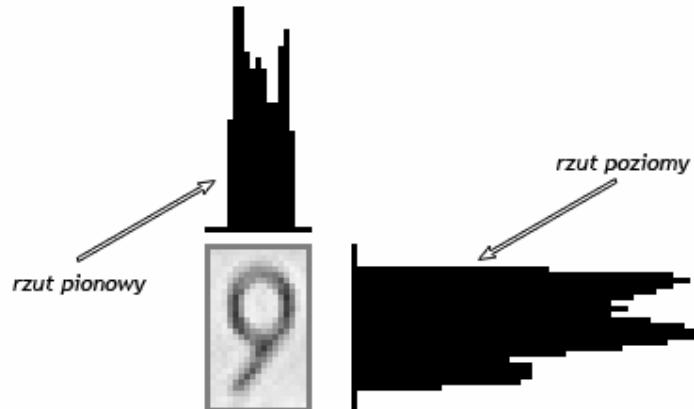
Komputerowe rozpoznawanie znaków (OCR – ang. Optical Character Recognition) jest bardzo szeroką dziedziną i istnieje wiele technik realizujących te

zadanie. W systemach ATRT wykorzystuje się głównie metody wykorzystujące: rzut jasności, oraz szablony (metody gęstościowe). Rzadziej wykorzystywane są cechy topologiczne znaków.

Metodami decyzyjnymi mogą być zarówno sieci neuronowe, jak i systemy ekspertowe. Obecnie coraz częściej wykorzystuje się sieci neuronowe ze względu na szybkość przetwarzania danych oraz dużą zdolność do adaptowania się do zmiennych warunków rozpoznawania, co jest szczególnie ważne przy systemach działających w warunkach atmosferycznych.

2.8.2. Rozpoznawanie znaków przy użyciu rzutu jasności

Algorytm rzutu jasności został opisany w rozdziale 2.7.2 przy okazji omawiania segmentacji znaków tablicy tą metodą. Tej samej metody można użyć do rozpoznawania znaków. Wystarczy spojrzeć na rysunek 18, aby dostrzec, że dla obu cyfr „0” wykres rzutu jasności jest bardzo podobny. Może się jednak zdarzyć, że dwie różne litery będą miały podobny rzut. Dzieje się to na przykład w przypadku liter „W” i „M”. Dlatego lepsze rezultaty osiąga się badając dwa rzuty: poziomy i pionowy (Rysunek 23).



Rysunek 23. Rzut pionowy i poziomy obszaru znaku

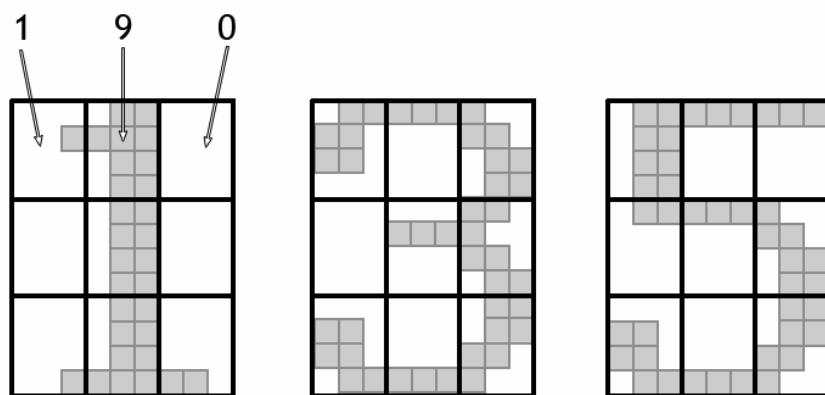
Ze względu na możliwe niewielkie błędy w wykryciu pozycji i obszaru znaku, rzuty jasności trzeba normalizować oraz wyszukiwać ich prawidłowe położenie względem porównywanego wzorca. Korekcję taką należałoby przeprowadzać dla wszystkich wzorców, z którymi porównywałoby się rzut badanego znaku. Powoduje to wiele komplikacji w zastosowaniu tej metody, lub jej wrażliwość na błędy w przypadku niezastosowania korekcji.

2.8.3. Rozpoznawanie znaków przy użyciu cech gęstościowych (szablonów)

Metoda analizy cech gęstościowych jest pewnym rozwinięciem metod wykorzystujących rzuty. Tutaj również liczy się sumy jasności, z tym, że nie w liniach, a w równomiernie rozłożonych podobszarach danego obszaru.

„Cechy gęstościowe wyznacza się poprzez podział mapy bitowej znaku na pewną liczbę obszarów (identycznych dla wszystkich znaków) i zsumowanie wszystkich zapalonych pikseli w każdym z tych obszarów. W ten sposób powstaje wektor o elementach całkowitych o stałej długości.” [8].

Sposób podziału badanego obrazu może być w zasadzie dowolny, pod warunkiem, że jest jednakowy dla wszystkich badanych obszarów. Najczęściej jednak stosuje się podobszary prostokątne, głównie ze względu na prostotę algorytmów. Liczba podobszarów, czyli długość wektora cech, musi być dobrana eksperymentalnie. Długość ta może zależeć np. od kroju znaków. Wektor cech nie może być zbyt krótki, ponieważ liczba informacji zawartych w takim wektorze może być zbyt mała żeby odróżnić podobne do siebie znaki. Wektor nie może być też zbyt długi, ponieważ informacje w nim zawarte będą zbyt szczegółowe, co może znacznie utrudnić, albo wręcz uniemożliwić prawidłową klasyfikację znaków.



Rysunek 24. Podział obszarów na podobszary w celu wyznaczenia cech gęstościowych. Na podstawie: [8].

Na rysunku 24 przedstawiono przykład podziału znaków na siatki 3x3. Dla cyfry „1” pokazano przykład liczenia pikseli w podobszarach. Wszystkie cechy dla podanych obszarów przedstawiają się następująco:

- dla cyfry „1”: 1, 9, 0, 0, 8, 0, 1, 9, 2
- dla cyfry „3”: 6, 3, 7, 0, 3, 7, 6, 3, 7
- dla cyfry „5”: 8, 3, 3, 2, 3, 7, 6, 3, 7

Jak widać, różnice cech dla cyfry „1” i „3” są dość znaczne. Natomiast dla cyfr „5” i „3” różnice nie są tak wyraźne i pojawiają się tylko w przypadku 3 z 9 elementów wektora. Gdyby do tych obszarów wprowadzić pewne zakłócenia, to mogłoby się okazać, że rozpoznanie nie będzie możliwe, lub będzie błędne. Niezbędne jest zastosowanie dłuższego wektora cech, czyli podziału na większą liczbę podobszarów.

3. Akwizycja sekwencji obrazów

3.1. Wstęp

Istotnym problemem, który występuje w przypadku tworzenia systemów ARTR, jest akwizycja sekwencji obrazów wykorzystywanych do rozpoznawania tablic i analizy ruchu. Nie jest to sprawa prosta. Pojawia się wiele czynników, które mają bardzo znaczący wpływ na późniejszą jakość działania systemu.

Ponieważ w opracowanym systemie śledzenie pojazdów oparte jest na śledzeniu ich tablic rejestracyjnych, dlatego kluczową kwestią jest prawidłowe rozpoznanie tablicy rejestracyjnej. Nieprawidłowe rozpoznanie tablicy skutkuje nie tylko niemożnością wyznaczenia prędkości, ale także wieloma problemami, jak np. przypisanie wykroczenia innemu kierowcy lub, co gorsze, nadanie nieprawidłowych przywilejów takich jak np. pozwolenie na wjazd na kontrolowany teren nieuprawnionemu pojazdowi.

W tworzonym systemie nie zastosowano bezpośredniego połączenia między urządzeniem przechwytyującym obrazy, a komputerem wykonującym rozpoznanie tablic. Sekwencje obrazów kopiowane były na dysk komputera w formie plików, a następnie ładowane kolejno przez program. Zastosowano taką metodę, ponieważ opracowywanie wystarczająco sprawnego oraz szybkiego systemu transmisji sekwencji zdjęć do programu rozpoznającego nie jest sprawą banalną, a ponadto nie było celem tej pracy.

Przechwytywanie sekwencji obrazów i składowanie ich na dysku umożliwiało rozwijanie i testowanie programu w trybie off-line. Uniezależniało to od pory dnia, warunków pogodowych oraz aktualnego ruchu na drodze, zarazem pozwalając na wykonywanie różnych algorytmów na tych samych sekwencjach obrazów.

3.2. Zastosowany sprzęt

Do wykonywania sekwencji zdjęć wykorzystano dwa różne aparaty cyfrowe z rozbudowanymi funkcjami kontroli przesłony, czasu naświetlania, oraz czułości matrycy. Jednak podstawową funkcją, którą musi zapewniać używany w systemie aparat, jest funkcja rejestrowania sekwencji zdjęć w trybie ciągłym. Funkcję tę zapewniały oba wykorzystane aparaty.

Istotne parametry techniczne wykorzystywanych aparatów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry techniczne aparatów wykorzystanych w projekcie. Źródło: www.dpreview.com.

Parametr	Olympus C-5050 Zoom	Canon PowerShot S3 IS
Liczba pikseli	5 Mpx	6 Mpx
Rozdzielcość maksymalna	2560 x 1920	2816 x 2112
Zakres ogniskowych	35 – 105 mm	36 – 432 mm
Maks. powiększenie	3 x	12 x
Zakres przesłony	F1.8 – F2.5 / F10	F2.7 – F3.5 / F8
ISO	64, 100, 200, 400	80, 100, 200, 400, 800
Minimalny czas ekspozycji	1/1000 s	1/3200 s
Stabilizacja obrazu	Nie	Tak
Zdjęcia sekwencyjne	Tak (1,3 – 1,7 zdj./s)	Tak (2,3 zdj./s)



Rysunek 25. Aparaty wykorzystane do rejestrowania sekwencji zdjęć: (a) Olympus C-5050 Zoom; (b) Canon PowerShot S3 IS.
Źródło: www.dpreview.com.

We wczesnym stadium, system był rozwijany i testowany z zastosowaniem sekwencji zdjęć tworzonych przy użyciu aparatu Olympus C-5050. Jest to aparat półprofesjonalny posiadający zarówno tryb automatyczny jak i tryb ręczny, umożliwiający przejęcie pełnej kontroli nad parametrami rejestrowanych zdjęć.

W wyniku niedostatecznych rezultatów rozpoznawania, otrzymanych przy analizie sekwencji obrazów rejestrowanych aparatem Olympus C-5050, zdecydowano się na wykorzystanie innego aparatu. Po analizie parametrów technicznych

oferowanych przez różne modele aparatów, zdecydowano się wykorzystać aparat Canon PowerShot S3 IS. Jest to również aparat półprofesjonalny, jednakże ze względu na rozwój techniki, oferuje on wyższe parametry techniczne od aparatu Olympus C-5050.

3.3. Analiza problemów występujących przy akwizycji sekwencji zdjęć

Podczas przygotowywania sprzętu do rejestracji zdjęć, a także już podczas samej rejestracji napotkano na wiele problemów, które należało rozwiązać. Problemy te można podzielić na dwie grupy w zależności od tego czy są efektem jakości zastosowanego sprzętu, czy nie.

Problemy wynikające z jakości zastosowanego sprzętu są to głównie:

- jasność, kontrast i oświetlenie
- ostrość i efekt poruszenia
- rozdzielcość oraz szybkość transmisji danych

Wśród problemów, które nie wynikają z jakości sprzętu można wyróżnić:

- warunki atmosferyczne
- przesłanianie
- cienie
- refleksy

Wśród wszystkich powyższych zagadnień, można wyróżnić takie, które da się zniwelować, oraz takie, których nie da się całkowicie a nawet częściowo zlikwidować. Do tych pierwszy należą przede wszystkim te, które są wynikiem zastosowania niskiej klasy sprzętu. Da się je rozwiązać lub zminimalizować wykorzystując sprzęt wyższej klasy lub urządzenia wspomagające. Do drugiej kategorii należą wszystkie zakłócenia optyczne, takie jak przesłanianie lub refleksy.

Istotnie jest również to, że niektóre z powyższych problemów są ze sobą powiązane. Na przykład słabe oświetlenie skutkuje nie tylko słabszą jakością zdjęcia, ale także powstawaniem większych rozmyć.

3.3.1. Jasność, oświetlenie

Sekwencje zdjęć wykonywano przy oświetleniu naturalnym, w dzień przy niezachmurzonym, umiarkowanym zachmurzonym lub całkowicie zachmurzonym niebie, przy dobrych warunkach atmosferycznych.

Jednym z pierwszych napotkanych problemów był problem z jasnością oraz kontrastem obrazów. Okazało się bowiem, że proste aparaty fotograficzne oferują zbyt niską jasność obiektywu oraz czułość matrycy, a co za tym idzie jasność i kontrast rejestrowanych zdjęć są niedostateczne przy słabszym oświetleniu, np. późnym popołudniem, lub przy zachmurzonym niebie. Przykład zdjęcia wykonanego w złych warunkach oświetleniowych przedstawiony jest na rysunku 26. Zdjęcie jest niewyraźne, a odczytanie tablicy, nawet przez człowieka, praktycznie niemożliwe.



Rysunek 26. Zdjęcie wykonane w niedostatecznych warunkach oświetleniowych.

Wykorzystane w projekcie aparaty marki Olympus i Canon posiadały obiektywy o dużej jasności, dzięki czemu możliwe stało się rejestrowanie zdjęć o wystarczającej jasności i dużym kontraście nawet w dość trudnych warunkach atmosferycznych. Pomimo tego, że aparat Olympus posiadał wyższą jasność obiektywu ($f/1,6$), to zdjęcia uzyskiwane aparatem Canon ($f/2,7$) miały zbliżoną jakość, a czasem okazywały się nawet lepsze od tych zarejestrowanych aparatem Olympus. Prawdopodobnie było to zasługą wyższej czułości matrycy oraz stabilizacji obrazu.

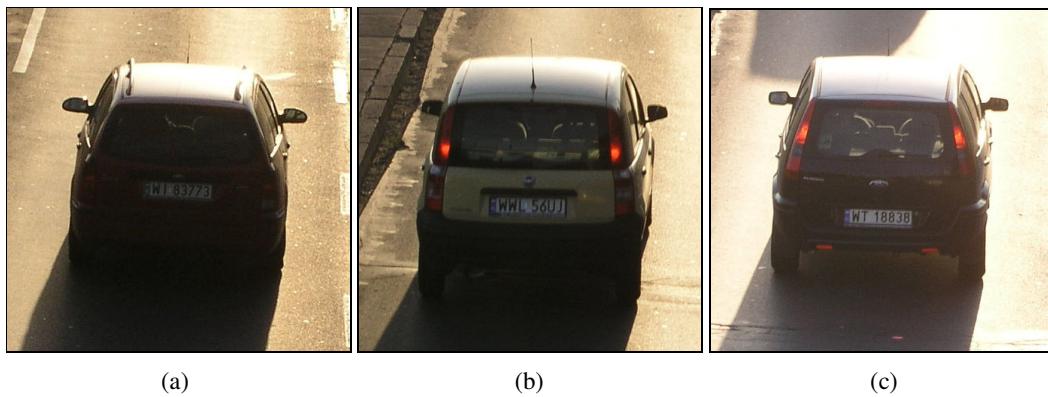
3.3.2. Problem ekspozycji

Aby obraz mógł zostać zarejestrowany przez aparat cyfrowy, do matrycy aparatu musi przez pewien określony czas docierać obraz w postaci światła przepuszczonego przez obiektyw. Im dłużej aparat rejestruje obraz, tym zdjęcie jest jaśniejsze. Czas rejestracji nazywa się **czasem ekspozycji** (znane są również nazwy: czas naświetlania oraz czas otwarcia migawki) i jest dobierany tak, by zdjęcie wyglądało jak najbardziej naturalnie. Realizuje się to poprzez analizę histogramu całego zdjęcia lub w pewnych zdefiniowanych częściach kadru. Dobór czasu naświetlania musi być skorelowany z innymi nastawami mającymi wpływ na jasność zdjęcia, dlatego w

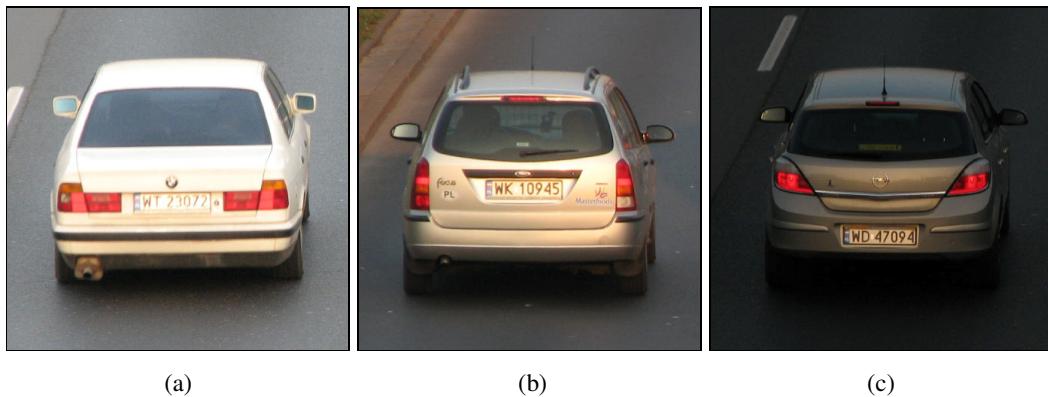
większości aparatów jest przeprowadzany przez automatykę aparatu. Większość aparatów posiada jednak funkcję ręcznej korekcji ekspozycji, dzięki czemu można poprawić ustawienia automatyczne według własnego uznania. Wartość korekcji ekspozycji określa się w tzw. działkach **EV** (ang. Exposure Value) [25].

Funkcje automatycznego ustawiania przesłony okazują się czasem zawodne, dlatego że wyrównują jasność zdjęcia na podstawie całego kadru, przez co w pewnych warunkach mniejsze elementy, takie jak właśnie tablice rejestracyjne, bywają prześwietlone lub niedoświetlone. Problem ten jest związany z nierównomiernym oświetleniem rejestrowanego obrazu. Szczególnie jest to widoczne podczas rejestrowania zdjęć „pod słońce” lub odwrotnie, w kierunku padania promieni słonecznych. Sytuacje takie przedstawione są na rysunkach odpowiednio 27 oraz 28.

Oba aparaty posiadały funkcję korekcji ekspozycji, co pozwalało wyregulować jasność zdjęć w przypadku, gdy tablice rejestracyjne były na nich prześwietlone lub niedoświetlone.



Rysunek 27. Zdjęcia zarejestrowane w kierunku „pod słońce”:
 (a) ustawienia automatyczne; (b) korekcja +1EV; (c) korekcja +2EV.



Rysunek 28. Zdjęcia zarejestrowane w kierunku padania promieni słonecznych: (a) ustawienie automatyczne; (b) korekcja -1EV; (c) korekcja -2EV.

W przypadku, gdy zdjęcie jest rejestrowane „pod słońce”, światło słoneczne odbija się od jezdni powodując „oślepienie” aparatu, który stwierdza, że scena jest bardzo jasna i automatycznie obniża czas ekspozycji pozostawiając tył pojazdu niedoświetlony. Korekcja ekspozycji pozwala na rozjaśnienie kadru, dzięki czemu tablica rejestracyjna jest wyraźnie widoczna (rysunki 27b oraz 27c).

Drugi przykład przedstawiony jest na rysunku 28. Zdjęcia zostały zarejestrowane w kierunku padania promieni słonecznych. Ze względu na duży współczynnik odbicia światła tablicy rejestracyjnej, jest ona dużo jaśniejsza od pozostałej części kadru i dlatego na zarejestrowanym zdjęciu jest prześwietlona. Dopiero zmniejszenie ekspozycji pozwala na odczytanie numerów rejestracyjnych (zdjęcia 28b i 28c).

3.3.3. Rozmycie pochodzące od ruchu pojazdów

W wyniku tego, że czas ekspozycji przy słabym oświetleniu może sięgać nawet kilkudziesięciu milisekund, pojazdy, które poruszają się po drogach z dużymi prędkościami, mogą w tym czasie pokonać nawet kilkanaście centymetrów. Jeżeli uwzględni się, że wysokość znaków tablicy rejestracyjnej to ok 10cm, to okaże się, że przy dużych czasach naświetlania, znaki te będą zupełnie nieczytelne. Powyższe rozważania nie uwzględniają efektu perspektywy, która pozornie zmniejsza prędkość pojazdów (Rozdział 3.4). Przykładowe zdjęcie pokazane jest na rysunku 29. Widać tu wyraźnie efekt rozmycia, a znaki tablicy rejestracyjnej są mocno zniekształcone.



Rysunek 29. Rezultat długiego czasu naświetlania podczas rejestracji szybko poruszających się pojazdów. Czas naświetlania = 1/60s. W tym czasie pojazd jadący 50km/h przejeżdża ok. 23cm.

Aby zminimalizować wpływ ruchu na ostrość zdjęcia, należy dążyć do skrócenia czasu ekspozycji. Skrócenie czasu ekspozycji jest możliwe jest to poprzez:

- zwiększenie jasności obiektywu
- zwiększenie czułości matrycy
- zmniejszenie przesłony

Pierwszy parametr nie podlega regulacji, możliwa jest jedynie fizyczna wymiana obiektywu na inny. Wymianę taką umożliwiają jedynie aparaty profesjonalne. Oba wykorzystane w projekcie aparaty posiadają zintegrowane, niewymienne obiektywy.

Drugi parametr – czułość matrycy – jest zwykle dobierany automatycznie, jednak wiele aparatów cyfrowych pozwala na jego ręczną zmianę przez użytkownika. Niestety, zwiększanie czułości matrycy prowadzi do znacznego zwiększenia się szumów. Na rysunku 30 przedstawiono dwie fotografie tego samego pojazdu w identycznych warunkach oświetleniowych, wykonane przy zastosowaniu różnej czułości matrycy. Widać wyraźnie szum, który pojawia się na zdjęciu zarejestrowanym z czułością ISO-800 (Rysunek 30b).



Rysunek 30. Szum matrycy w zależności od czułości matrycy:
(a) ISO-100; (b) ISO-800

Ostatni parametr – przesłona – najczęściej również jest dobierany automatycznie, jednak i w tym przypadku wiele aparatów pozwala na jego ręczną regulację. Większe otwarcie przesłony powoduje, że zdjęcia są jaśniejsze, niestety powoduje też zmniejszenie zakresu głębi ostrości. „W skrócie, pojęcie głębi ostrości oznacza obszar rozciągający się między najbliższym i najbardziej oddalonym, ostro odwzorowanym punktem na zdjęciu.” [25]. Ponieważ system powinien rozpoznawać tablice zarówno samochodów znajdujących się blisko jak i daleko, dlatego najlepiej byłoby gdyby głębia ostrości była jak największa (przesłona jak najmniejsza).

Ustawienie tego parametru jest kompromisem pomiędzy jasnością zdjęć a zakresem głębi ostrości i powinien on być dobrany eksperymentalnie.

3.3.4. Odbicia (refleksy świetlne)

Kolejnym problemem wynikającym z nieprawidłowego oświetlenia są refleksy świetlne. Ponieważ sekwencje zdjęć robione były w oświetleniu słonecznym, dlatego na pojazdach często widoczne były refleksy światła. Utrudnia to aparatom optymalne ustawienie jasności zdjęcia. Duża jasność refleksów powoduje, że aparat automatycznie zmniejsza jasność zdjęcia, przez co tablice na zdjęciu mogą być zbyt ciemne, aby mogły być prawidłowo rozpoznane.

Problem refleksów jest szczególnie widoczny na nowych tablicach rejestracyjnych, których tło stanowi powłoka o dużym współczynniku odbicia światła. Dzięki temu są one dobrze widoczne nawet przy słabym oświetleniu. Wadą tego rozwiązania jest zbyt duża jasność tablic przy bezpośrednim oświetleniu np. słońcem lub reflektorem, kiedy to taka tablica ma dużo większą jasność niż otoczenie, przez co przestaje być w ogóle widoczna na zdjęciu (zdjęcie w tym miejscu jest prześwietlone).



Rysunek 31. Szczególny rodzaj refleksów. Tablica ma tak wysoką jasność, że „oślepia” aparat i znaki tablicy przestają być w ogóle widoczne.

3.3.5. Warunki atmosferyczne

Ważnym aspektem przy rejestracji sekwencji zdjęć są warunki atmosferyczne. Należy spodziewać się, że są takie dni, gdy przejrzystość powietrza jest zmniejszona.

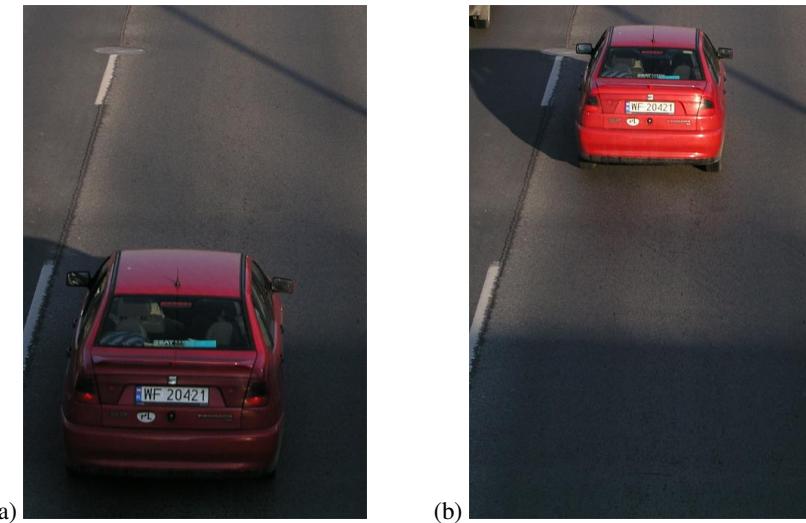
Może to być spowodowane wieloma przyczynami: mgłą, deszczem, śniegiem, kurzem, dymem, smogiem.

Niska przejrzystość powietrza jest problemem trudnym do wyeliminowania w systemach dynamicznych, które pracują w regularnym ruchu drogowym. Kamera znajdują się zwykle na otwartej przestrzeni, a pojazdy znajdują się kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt metrów od kamery, przez co przejrzystość powietrza istotnie wpływa na jakość zdjęć, a w rezultacie na jakość działania całego systemu.

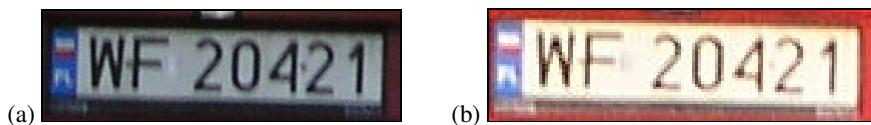
3.3.6. Cienie

Kolejnym problemem występującym przy rejestraniu zdjęć w zmiennych warunkach atmosferycznych przy wykorzystaniu jedynie oświetlenia słonecznego, jest powstawanie cieni. Jest to dość poważny problem, ponieważ słońce ciągle wędruje po niebie, dlatego w ciągu całego dnia różne obiekty mogą rzucać swoje cienie na rejestrowany obszar. W dodatku cienie te mogą być niejednorodne i często zasłaniają jedynie część rejestrowanego obszaru. Różnica jasności tablicy rejestracyjnej oświetlonej przez słońce i nieoświetlonej jest bardzo duża i może przekraczać zakres czułości matrycy typowego aparatu. Jeśli dwie tablice: oświetlona i nieoświetlona, znajdą się jednocześnie na obrazie, to jedna z nich będzie mogła być albo prześwietlona, albo niedoświetlona (w zależności od jasności otoczenia). Rozpoznanie tej tablicy może być niemożliwe.

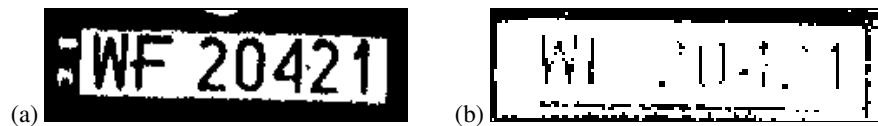
Na rysunku 32 przedstawiono sytuację, w której samochód przejeżdża przez obszar zacieniony. Na pierwszym zdjęciu samochód znajduje się w cieniu i jest wyraźnie ciemniejszy niż na drugim zdjęciu. Różnicę widać też na samych tablicach rejestracyjnych (Rysunek 33), druga tablica jest wyraźnie prześwietlona.



Rysunek 32. Problem cienia: (a) pojazd w obszarze zacienionym; (b) pojazd w obszarze niezacienionym.

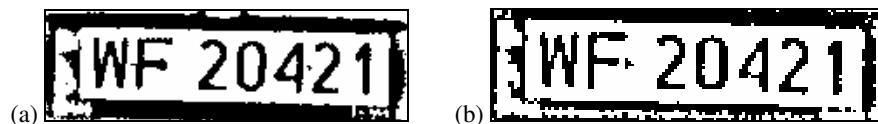


Rysunek 33. Obszar tablicy rejestracyjnej: (a) w obszarze zacienionym (z rysunku 32a); (b) w obszarze niezacienionym (z rysunku 32b).



Rysunek 34. Obszar tablicy rejestracyjnej z rysunku 33 poddany progowaniu z progiem 43%.

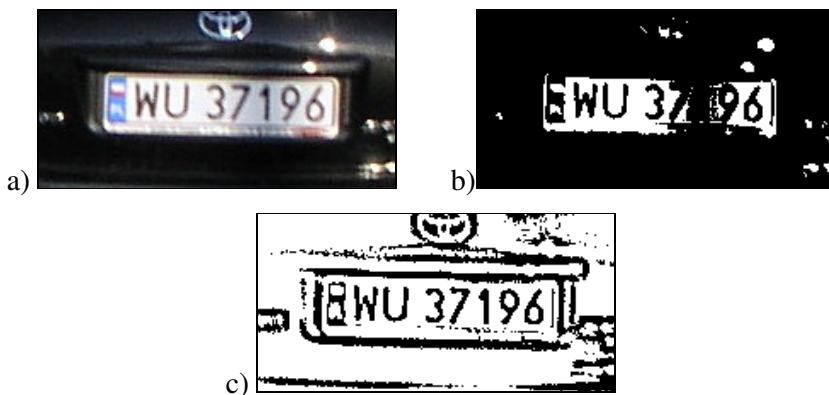
Poprawę można uzyskać na kilka sposobów. Przede wszystkim, na poziomie programowym konieczne jest zastosowanie progowania adaptacyjnego. Progowanie z jednym progiem dla całego obrazu nie daje dobrych rezultatów (Rysunek 34). W przypadku progowania adaptacyjnego, próg dla danego piksela wyliczany jest na podstawie pewnego otoczenia tego piksela. Jak widać na rysunku 35, znaki tablicy w przypadku obu obszarów zostały wyodrębnione poprawnie.



Rysunek 35. Obszar tablicy rejestracyjnej z rysunku 33 poddany progowaniu adaptacyjnemu

Prawdziwą potęgę progowania adaptacyjnego widać jednak dopiero wtedy, gdy tablica rejestracyjna jest tylko częściowo zacieniona. Przypadek taki został

przedstawiony na rysunku 36. Jak widać na środkowym obrazie, progowanie ze stałym progiem powoduje, że ciemniejsza część tablicy staje się nieczytelna. Progowanie adaptacyjne radzi sobie z tym problemem i wszystkie litery tablicy są poprawnie wydzielone z tła. Pewną wadą metod adaptacyjnych jest to, że na obrazie pojawia się dużo więcej szczegółów, przez co czas przetwarzania takiego obrazu znacząco wzrasta. Można tę wadę częściowo zniwelować dobierając odpowiednio parametry progowania adaptacyjnego.



Rysunek 36. Tablica częściowo zaciemiona: (a) obraz oryginalny; (b) progowanie ze stałym progiem; (c) progowanie adaptacyjne

Aby można było skutecznie rozpoznawać szczegóły na zaciemionych fragmentach obrazów, zastosowany aparat musi charakteryzować się rejestraniem obrazów o wysokiej dynamice. Dynamika obrazu jest ograniczona przez ilość kolorów, które mogą być przypisane jednemu pikselowi. Typowe aparaty rejestrują zdjęcia w palecie 24-bitowej. Bardziej zaawansowane wykorzystują paletę 36-bitową, dzięki czemu otrzymuje się większą przestrzeń barw, a co za tym idzie, osiąga się dużo większą dynamikę w jasnych i ciemnych partiach obrazu. Dzięki temu obszar taki można poddać progowaniu adaptacyjnemu i odczytać numery, mimo że pozornie tablica na obrazie ma mały kontrast. Podczas testów okazało się jednak, że dynamika zdjęć otrzymywanych z obu aparatów jest wystarczająca. Przykład pokazany jest na rysunku 37. Mimo, że pojazd na zdjęciu jest bardzo ciemny, a tablica rejestracyjna ledwo widoczna, to po zastosowaniu progowania adaptacyjnego otrzymuje się wyraźne litery tablicy rejestracyjnej.



(a)

(b)

Rysunek 37. Fragmentu obrazu o dużej dynamicie (a). Mimo pozornie niewielkiego kontrastu, obraz charakteryzuje się dużą szczegółowością. Widać to po wykonaniu progowania adaptacyjnego (b).

Inną metodą likwidacji cieni jest zastosowanie zewnętrznego oświetlenia. Należy jednak pamiętać, że bezpośrednie światło słoneczne jest bardzo silne, dlatego dodatkowy reflektor oświetlający tablice musiałby również emitować silne światło. Stosowanie takich reflektorów może być jednak niezgodne z prawem, ponieważ mogą one oślepiać kierowców. W takim wypadku można zastosować reflektory podczerwieni. Matryce aparatów są bardzo czułe na podczerwień, natomiast oko ludzkiej jej nie dostrzega. W związku z tym pojawiają się jednak kolejne problemy takie jak moc reflektora podczerwieni oraz wpływ silnego promieniowania podczerwonego na oko ludzkie.

3.3.7. Przesłanianie

Przesłanianie jest bardzo istotnym problemem w automatycznym rozpoznawaniu tablic rejestracyjnych, ponieważ jest zjawiskiem nieprzewidywalnym, trudnym do uniknięcia, a także trudnym do usunięcia. Zdarza się, że w wyniku przesłania, rozpoznanie numeru rejestracyjnego jest w ogóle niemożliwe – bardzo łatwo sobie wyobrazić liść, lub inny przedmiot przyklejony do tablicy przesłaniający całą literę, lub też nawet kilka liter. W historii automatycznego rejestrowania wykroczeń przy pomocy fotoradarów, zdarzały się nawet przypadki, gdy przelatujący ptak zasłaniał całą rejestrację uniemożliwiając odczytanie rejestracji nawet przez człowieka.

Warto w tym miejscu wspomnieć, że w czasie normalnego używania pojazdu tablica rejestracyjna ulega zabrudzeniu. Brud również w pewnym sensie „przesłania” tablicę rejestracyjną powodując zmniejszenie jej widoczności. § 26. Rozporządzenia Ministra Transportu w sprawie rejestracji i oznaczenia pojazdów mówi, iż „Utrzymywanie tablic i innych oznaczeń pojazdów, o których mowa w przepisach rozdziału 4, w należytym stanie i zapewnienie ich czytelności jest obowiązkiem kierującego pojazdem.”. Pomimo tego są kierowcy, którzy nie dbają o dostateczną czytelność tablic. Bywają również sytuacje, kiedy utrzymanie tablicy w czystości jest trudne, np. zimą, kiedy drogi posypywane są specjalną mieszanką piaskowo-solną. Mieszanka ta w połączeniu z wodą unosi się później spod kół samochodów i osiada na tablicach powodując szybkie ich zabrudzenie.



Rysunek 38. Różny poziom zabrudzenia tablic. Zdjęcia zarejestrowane zostały w identycznych warunkach oświetleniowych.

Jeszcze większe „przesłonięcie” tablicy powoduje śnieg. Ze względu na swoją lepkość przy pewnych temperaturach, śnieg może szybko pokryć grubą warstwą tablicę rejestracyjną uniemożliwiając jej odczytanie. Jednak są to przypadki ekstremalne i zdarzają się rzadko. Mimo to trzeba wiedzieć, że system w takich warunkach nie będzie pracował poprawnie.

Istotnym problemem jest też przesłanianie jednego pojazdu przez drugi. Z tego powodu kamera musi znajdować się pod pewnym kątem w stosunku do kierunku poruszających się pojazdów. Ustawienie to jednak wpływa na wiele innych czynników decydujących o prawidłowym działaniu systemu. Dokładne omówienie tego problemu znajduje się w rozdziale 3.4.

3.3.8. Rozdzielczość oraz szybkość transmisji

Aby skutecznie rozpoznawać znaki na tablicy rejestracyjnej niezbędna jest odpowiednia rozdzielczość zdjęcia. W zasadzie (przy rejestrowaniu tego samego obszaru), im jest ona większa, tym później większa jest dokładność rozpoznawania. Z drugiej strony powiększanie rozdzielczości powoduje wzrost ilości danych, które muszą zostać przesłane i przetworzone przez komputer. O ile nie ma to większego znaczenia w

systemach pracujących w trybie off-line, o tyle w systemach działających w czasie rzeczywistym szybkość przetwarzania ma znaczenie krytyczne. Zdjęcia muszą być natychmiast przesłane do komputera i tam przetworzone.

System rozpoznawania tablic rejestracyjnych wymaga dostarczenia sekwencji zdjęć, dlatego niezbędne jest zastosowanie aparatu cyfrowego z funkcją rejestrowania sekwencyjnego. Okazuje się, że nie wszystkie aparaty oferują taką funkcję, a nawet, jeśli oferują, to liczba zdjęć w takiej sekwencji nie jest duża (najczęściej nie więcej niż 10 zdjęć w serii). Ważna jest tutaj zarówno szybkość bufora danych (pamięć wewnętrzna, w której tymczasowo zapisywane są zdjęcia), szybkość kanału transmisyjnego, jak i możliwości samej pamięci zewnętrznej.

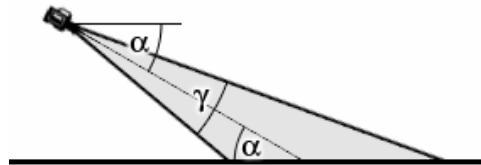
Początkowo użyty w projekcie aparat Olympus C-5050 umożliwiał rejestrowanie zdjęć sekwencyjnych z częstotliwością ok 1,5 zdjęcia na sekundę przy rozdzielczości 5Mpx (Mpx – ang. *megapixel* – jednostka nieoficjalna używana do określenia liczby pikseli obrazu zarejestrowanego przez dane urządzenie cyfrowe). Jednak ze względu na to, że użyta wraz z tym aparatem karta pamięci (Olympus XD 256MB typu M) nie nadawała z zapisywaniem zdjęć, wewnętrzny bufor aparatu dość szybko się zapełniał i aparat przerywał rejestrację. Efekt taki pojawiał się już po 7 zdjęciach. Zastosowanie szybszej karty pamięci (MemUp 1GB HighSpeed) pozwoliło na zarejestrowanie 12 zdjęć w jednej sekwencji. W zasadzie był to wystarczający wynik do testowania projektu w początkowej fazie, jednak ostateczne rozwiązanie powinno zapewniać nieprzerwany strumień obrazów. Dlatego rozpoczęto poszukiwania aparatu, który by sobie z tym poradził.

Jednym z aparatów oferującym funkcję nieprzerwanego rejestrowania zdjęć sekwencyjnych w pełnej rozdzielczości był Canon PowerShot S3 IS. Warunkiem koniecznym ciągłości transmisji jest użycie dostatecznie szybkiej karty pamięci. Warunek ten spełniła karta SanDisk Extreme III XD 2GB. Przeprowadzone testy wykazały, że zdjęcia były rejestrowane bez przerwy do czasu zapełnienia karty. W czasie testu zarejestrowano 706 zdjęć o rozdzielczości 6Mpx z prędkością ok. 2,3 zdjęcia na sekundę.

3.4. Umiejscowienie aparatu oraz obszar rejestracji

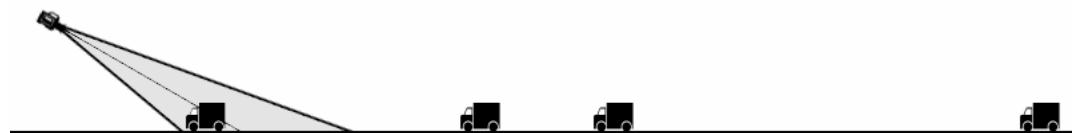
Umieszczenie kamery odgrywa kluczową rolę w zaprojektowanym systemie. Ważne jest tu zarówno miejsce zamontowania kamery, jej pochylenie (kąt α), ale także

kąt widzenia γ (Rysunek 39). Kąt widzenia γ zależy jest od długości ogniskowej, czyli od aktualnie ustawionego w aparacie powiększenia.



Rysunek 39. Ilustracja kąta pochylenia α oraz kąta widzenia γ .

Z punktu widzenia programu, istotny jest obszar rejestrowany przez kamerę. Z uwagi na to, że jednym z zadań programu jest określenie prędkości jadących pojazdów na podstawie kolejnych zdjęć, dany pojazd musi się pojawić co najmniej na dwóch kolejnych zdjęciach. Zatem obszar rejestracji musi być dostatecznie duży, tak żeby nawet szybko jadące pojazdy mogły być zarejestrowane co najmniej dwukrotnie. To jak duży musi być ten obszar, zależy od częstotliwości rejestrowania kolejnych zdjęć oraz od założonej maksymalnej prędkości, którą będzie w stanie wyznaczyć program.



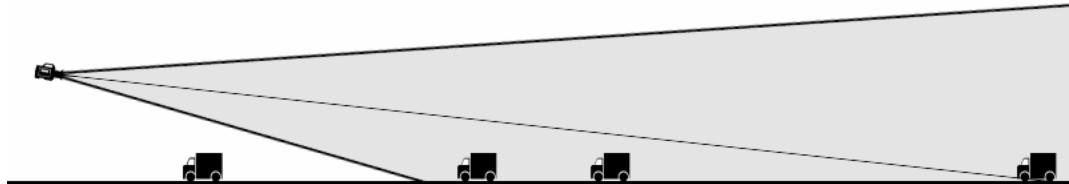
Rysunek 40. Schemat umieszczenia kamery – duże pochylenie kamery, krótka ogniskowa (bez powiększenia).



Rysunek 41. Obraz zarejestrowany przy zbyt dużym pochyleniu kamery.

Przykładowe umieszczenie kamery przedstawione jest na rysunku 40. Można zauważyć, że obszar rejestracji jest dość mały, widoczne jest to wyraźnie na rysunku 41. Na zdjęciu zmieściłyby się najwyżej dwa samochody. Dodatkowym problemem przy dużych kątach pochylenia kamery jest rozmycie spowodowane ruchem pojazdów nawet przy krótkich czasach ekspozycji (Rysunek 41).

Duży obszar rejestracji można uzyskać poprzez zmniejszenie pochylenia kamery. Rejestrowany jest wtedy dalszy fragment drogi. Niestety wraz ze zmniejszaniem kąta pochylenia kamery, zmniejsza się również rozmiar pojazdów na zdjęciach. Odczytanie ich tablic rejestracyjnych może być trudne. Dalsze zmniejszanie kąta nachylenia kamery przy niezmienionej ogniskowej powoduje pojawienie się na zdjęciach horyzontu (Rysunek 43). Obszar nad horyzontem pozostaje niewykorzystany, również samochody w pobliżu horyzontu są zbyt małe żeby możliwe było jakiekolwiek rozpoznawanie ich tablic, dlatego też takie ustawienie kamery jest nieprawidłowe.



Rysunek 42. Schemat umieszczenia kamery – małe pochylenie kamery, krótka ogniskowa (bez powiększenia).



Rysunek 43. Obraz zarejestrowany przy małym kącie pochylenia kamery z krótką ogniskową (bez powiększenia).

W praktyce okazuje się, że z wysokości ok. 7 metrów przy zastosowaniu standardowego obiektywu z domyślnie ustawioną najkrótszą ogniskową (potocznie „bez powiększenia”) nie można optymalnie dobrać ustawienia kamery tak, aby wykonane zdjęcia obejmowały odpowiednią przestrzeń, a pojazdy były odpowiedniej wielkości. Albo pojazdy na zdjęciach są zbyt małe, albo obszar rejestracji jest zbyt mały.

Rozwiązaniem tego problemu jest zwiększenie ogniskowej, czyli zastosowanie powiększenia. Dzięki temu zmniejsza się kąt widzenia, co wpływa pozytywnie na wielkość pojazdów na zdjęciach. Dodatkowo perspektywa sprawia, że obraz zostaje „spłaszczony”, dlatego rejestrowany obszar jest większy niż na rysunku 41. Wystarczy porównać białe pasy namalowane na jezdni, widoczne na rysunku 41 oraz 45. W rzeczywistości mają one tę samą długość i leżą w tej samej odległości od siebie.



Rysunek 44. Schemat umieszczenia kamery – optymalne pochylenie kamery, dłuża ogniskowa (powiększenie 2x).



Rysunek 45. Obraz zarejestrowany przy optymalnym pochyleniu kamery oraz powiększeniu 4x.

Spłaszczenie obrazu ma jeszcze jedną ważną zaletę, otóż, jeśli samochody będą jechać w kierunku kamery, to odległość, którą przebywają w danym okresie czasu zostanie pozornie zmniejszona, a zatem prędkość pozorna tych pojazdów również

zostanie zmniejszona. Dzięki temu można stosować dłuższe czasy naświetlania bez efektu poruszenia.

Zwiększenie ogniskowej wpływa również pozytywnie na geometrię otrzymywanych obrazów.

Rejestrowanie drogi pod małym kątem ma też swoje wady. Przede wszystkim, wraz ze zmniejszaniem pochylenia kamery, zwiększa się problem przesłaniania się pojazdów nawzajem. Zakłada się, że pojazdy poruszające się po drogach zachowują między sobą odstęp. W momencie, gdy na drodze powstanie zator, kierowcy zmniejszają prędkość, co pozwala im zachowywać mniejsze odstępy między sobą. Zmniejszenie dystansu między pojazdami powoduje, że zaczynają się one przesłaniać (Rysunek 46).



Rysunek 46. Samochody stojące w „korku” przesłaniają się wzajemnie.

Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest zastosowanie algorytmu adaptacji ustawień kamery do aktualnej sytuacji na drodze. Wiadomo, że zator nie pojawia się od razu, kierowcy dojeżdżający do końca zatoru, zmniejszają prędkość, dzięki czemu można zwiększyć pochylenie kamery tak, żeby obserwować pojazdy pod większym kątem. Zmniejsza się wtedy ryzyko, że pojazdy będą się zasłaniać. Problem szybko jadących pojazdów nie jest tu tak istotny, ponieważ w takich warunkach prędkości są bardzo małe lub nawet zerowe. W momencie, gdy pojazdy zaczynają poruszać się szybciej, można dokonać ponownej korekcji ustawień kamery, aby powróciła ona do swoich pierwotnych ustawień.

3.5. Podsumowanie jakości zastosowanych aparatów cyfrowych

Oba aparaty należą do tej samej klasy aparatów pół-profesjonalnych z rozbudowanymi funkcjami kontroli parametrów rejestrowanych zdjęć. Jednak aparat Canon PowerShot S3 IS posiadał kilka bardzo istotnych dla działania systemu zalet w stosunku do aparatu Olympus C-5050:

- możliwość rejestracji sekwencji zdjęć w trybie HighSpeed (2,3 zdjęcia/sekundę w pełnej rozdzielczości i najniższej kompresji. Liczba zdjęć jest ograniczona przez pojemność karty pamięci. Jest to obecnie jedyny aparat w swojej klasie z takimi możliwościami. Przy tej częstotliwości rejestracji zdjęć, pojazdy pojawiają się na kilku kolejnych klatkach, a nie jak w przypadku Olympusa na jednej lub maksymalnie dwóch.
- wyższa rozdzielczość obrazu
- niższa kompresja obrazu
- optyczna stabilizacja obrazu, umożliwiająca rejestrowanie wyraźnych zdjęć nawet podczas niewielkich drgań aparatu, co się często zdarza przy mocowaniu na wysokim maszcie.
- wyższa czułość matrycy,
- większy zoom, dzięki czemu możliwe stało się spełnienie warunku optymalnego ustawienia aparatu (Rozdział 3.4), co nie było osiągalne przy użyciu aparatu Olympus C-5050.
- niższe szумy matrycy

Niestety żaden z aparatów nie posiadał możliwości regulacji odstępu czasowego między kolejnymi ujęciami. Czas ten był stały w przypadku aparatu Canon, a w przypadku aparatu Olympus nieznacznie zależał od wybranych ustawień jakości zdjęć.

Z uwagi na wszystkie wymienione zalety aparatu Canon PowerShot S3 IS, to głównie ten model był używany w czasie rozwijania i testowania programu.

3.6. Wyznaczanie czasu rejestracji zdjęć

3.6.1. Metody wyznaczania czasu rejestracji zdjęć

Określanie prędkości pojazdów na podstawie kolejnych zdjęć wymaga znajomości czasu, który upłynął między kolejnymi zdjęciami. Można to zrealizować zarówno sprzętowo jak i programowo.

W przypadku systemu pracującego w trybie on-line, istnieje możliwość kontrolowania linii sygnałowej odpowiadającej za rozpoczęcie czasu rejestracji zdjęcia VSYNC. Sygnał VSYNC odpowiada za synchronizację pionową i jest podawany jednokrotnie podczas rejestrowania danej klatki [28].

Rejestracja zdjęć, które mają być następnie wykorzystane w analizie off-line, uniemożliwia wykorzystanie powyżej opisanej metody, ponieważ w momencie rejestracji nie posiadano żadnego urządzenia do zapisywania czasu pochodzącego z linii VSYNC. Z tego powodu próbowano znaleźć inny sposób na określenie tego czasu. W ogólności można wyróżnić dwie metody: wykorzystanie informacji zapisanych w pliku, lub wykorzystanie informacji o częstotliwości rejestracji zdjęć przez dany aparat.

3.6.2. Nagłówek EXIF

Okazuje się, że czas rejestracji zdjęcia jest zapisywany w pliku razem ze zdjęciem, zgodnie ze standardem EXIF (Exchangeable Image File Format) [11]. Standard ten przewiduje takie pola jak: *DateTimeDigitized* oraz *SubsecTimeDigitized*. Pierwsze pole oznacza czas zarejestrowania zdjęcia z dokładnością do jednej sekundy, natomiast drugie pole jest jego uzupełnieniem i określa tysięczne części sekundy.

Niestety oba aparaty, które były wykorzystywane w czasie testów, pozostawiły pole *SubsecTimeDigitized* puste, przez co maksymalna dokładność odczytu czasu zarejestrowania zdjęcia wynosi 1s. Oczywiście taka dokładność jest całkowicie niewystarczająca, szczególnie przy częstotliwości rejestracji zdjęć wynoszącym około 2,3 zdjęcia na sekundę (dane producenta).

3.7. Badanie częstotliwości rejestracji zdjęć sekwencyjnych

Ponieważ aparat rejestruje zdjęcia sekwencyjnie, z teoretycznie stałą częstotliwością, dlatego można wykorzystać informację o tej częstotliwości od wyznaczenia odstępu czasowego między kolejnymi zdjęciami. Jednak częstotliwość rejestracji zdjęć sekwencyjnych, podawana przez producenta może być niedokładna i

niepewna, dlatego przeprowadzono badania, które miały na celu wyznaczenie zarówno samego interwału czasowego, jak i jego powtarzalność.

Jedną z metod pomiaru czasu rejestrowania zdjęć jest przedstawiona wcześniej analiza linii sygnałowej wyzwalającej rejestrowanie zdjęcia. Jednak sposób ten wymagałby ingerencji w urządzenie. Postanowiono więc dokonać pomiaru metodami bezinwazyjnymi. Wszystkie opisane poniżej badania wykonano przy użyciu aparatu Canon PowerShot S3 IS.

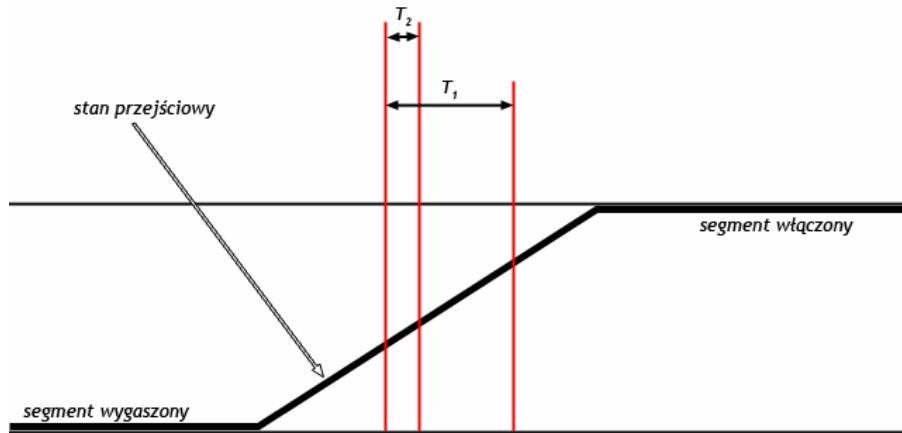
3.7.1. Wykorzystanie stopera – eksperymenty

Pierwszym pomysłem na określenie czasu rejestracji zdjęcia, było rejestrowanie sekwencji zdjęć ekranu uruchomionego stopera. Otrzymuje się w ten sposób serię zdjęć, na których widać kolejne czasy. Później można w prosty sposób wyznaczyć różnicę między czasem widocznym na kolejnych zdjęciach, a co za tym idzie, różnicę w czasie rejestracji kolejnych zdjęć. Niestety rozwiązań to ma dość dużą wadę. Otóż stopery elektroniczne posiadają wyświetlacze LCD, których czas reakcji jest stosunkowo długi. W trakcie przełączania cyfry, niektóre segmenty wyświetlacza 7-segmentowego muszą zostać wygaszone, a niektóre zapalone. Jeśli aparat uchwyci akurat moment przełączania cyfr, to niektóre segmenty cyfr będą zarejestrowane w stanie przejściowym, a zatem cyfra na zdjęciu może nie być czytelna (Rysunek 47).



Rysunek 47. Fragment zdjęcia z uruchomionego stopera elektronicznego. Czas ekspozycji 1/1000s.

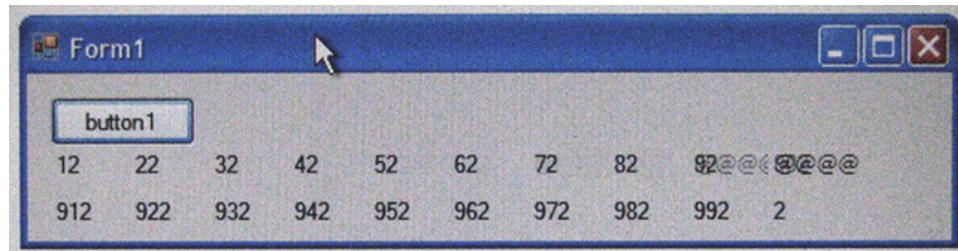
Warto zauważyć, że zmniejszenie czasu ekspozycji w tym przypadku nie daje praktycznie żadnych pozytywnych efektów, ponieważ głównym powodem rozmycia segmentów wyświetlacza LCD na zdjęciu nie jest rejestrowanie kilku jego stanów, ale jednego stanu przejściowego. Skrócenie czasu ekspozycji z T_1 do T_2 spowoduje, że aparat zarejestruje mniejszy fragment stanu przejściowego, ale ciągle będzie to właśnie ten stan przejściowy (Rysunek 48).



Rysunek 48. Schemat przełączania segmentu wyświetlacza LCD.

Pewnym pomysłem na rozwiązywanie tego problemu było wykorzystanie stopera analogowego (ze wskazówkami mechanicznymi), jednak stopery te są obecnie bardzo rzadko spotykane, a te, które udało się zdobyć do testów, mają zbyt małą dokładność (rzędu 0,25 s).

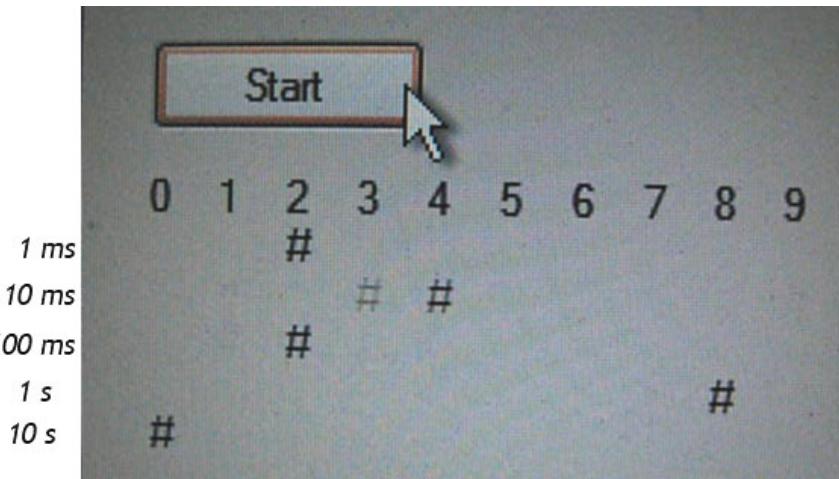
W związku z tym, że zamazanie cyfr LCD jest skutkiem zmiany stanu segmentów wyświetlacza 7-segmentowego, pojawił się pomysł, aby zamiast stopera wykorzystać ekran komputera, a kolejne czasy wyświetlać w innych miejscach ekranu. Możliwości odczytania liczby są wprawdzie także czasem ograniczone, jednak dodatkowo wstawiony wskaźnik składający się z czterech znaków @ umożliwia odgadnięcie tej liczby (Rysunek 49).



Rysunek 49. Fragment zdjęcia „stopera” komputerowego. Czas ekspozycji 1/1000s.

Rozwinięciem tego pomysłu było zastosowanie samych wskaźników zamiast cyfr, dzięki czemu można było jeszcze dokładniej zaobserwować aktualny czas. Łatwiej bowiem odczytać położenie wskaźnika na ekranie, niż odczytać niewyraźną cyfrę. Stoper taki został przedstawiony na rysunku 50 – przedstawia on na tym zdjęciu wynik 8,242 sekundy od startu. Ze względu na czas reakcji matrycy, również tutaj pojawiają się problemy. W linii odpowiadającej liczbie dziesiątek milisekund (10 ms) widoczne są

dwa wskaźniki. Jeden z nich jest „zapalany”, a drugi wygaszany. Ponieważ wskaźniki wędrują od lewej strony do prawej, dlatego można wziąć pod uwagę tylko prawy wskaźnik.



Rysunek 50. Fragment zdjęcia drugiej wersji „stopera” komputerowego. Czas ekspozycji 1/1000s.

Przeprowadzone badania wskazują, że dzięki takiemu rozwiązaniu, można uzyskać czas z dokładnością do ± 20 ms. Jest to nadal zbyt mała dokładność, żeby precyzyjnie wyznaczyć powtarzalność interwału czasowego między kolejnymi zdjęciami, ale wystarczająca, aby wyznaczyć średnią częstotliwość rejestracji zdjęć.

W czasie testu wykonano 800 zdjęć, a czas rejestracji pierwszego i ostatniego został odczytany ze zdjęcia ekranu stopera z rysunku 50 (niezbędne było zapisywanie liczby przepełnień licznika). Różnica czasów wyniosła $346,31 \pm 0,04$ s. Ze względu na to, że liczba odstępów czasowych jest o 1 mniejsza od liczby zdjęć, różnicę czasów podzielono na 799. Otrzymano średni interwał równy $433,43 \pm 0,05$ ms.

3.7.2. Metoda akustyczna – eksperymenty

Aparaty cyfrowe, w przeciwieństwie do aparatów analogowych, nie wymagają stosowania mechanicznej migawki, ponieważ matryca może być wystawiona na działanie światła przez cały czas, a czas ekspozycji regulowany jest elektronicznie poprzez podawanie odpowiednich sygnałów sterujących matrycą. Jednak większość aparatów cyfrowych posiada taką migawkę, głównie dlatego, że spełnia ona też rolę przesłony. W czasie robienia zdjęć takim aparatem słyszalne są więc dźwięki wydawane przez tę migawkę.

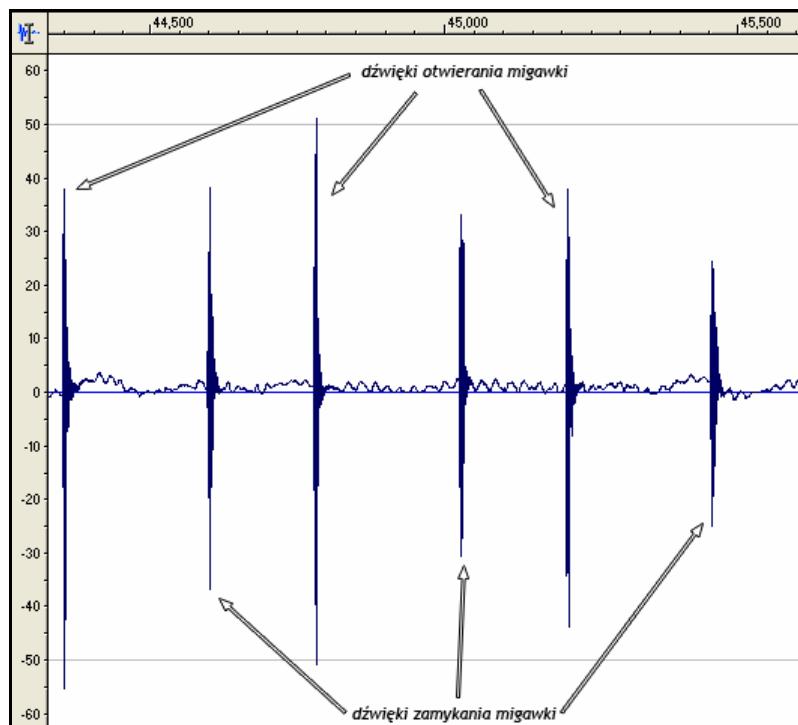
Jeśli podczas rejestrowania sekwencji zdjęć, dźwięki otwarcia migawki pojawiają się regularnie w jednakowych odstępach czasu, to można przypuszczać, że

również odstęp pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi zdjęciami jest identyczny jak odstęp między kolejnymi dźwiękami otwarcia migawki. Można również przypuszczać, że opóźnienie w rejestracji zdjęcia spowodowałoby, że aparat opóźniłby moment kolejnego otwarcia migawki, co odbiłoby się na wynikach badania.

W związku z powyższym, do kolejnego badania użyto mikrofonu oraz programu komputerowego do rejestracji dźwięku. Zarejestrowany dźwięk był następnie wizualizowany jako wykres amplitudy w czasie. Wysokie częstotliwości próbkowania układów dźwiękowych stosowanych obecnie w komputerach umożliwiły próbkowanie z częstotliwością 100 kHz. Wynika z tego, że kolejne próbki rejestrowane były co 10ns. Rozdzielcość taka okazała się aż nazbyt duża, ponieważ trudno było określić precyjnie czas rozpoczęcia dźwięku migawki z dokładnością do jednej próbki.

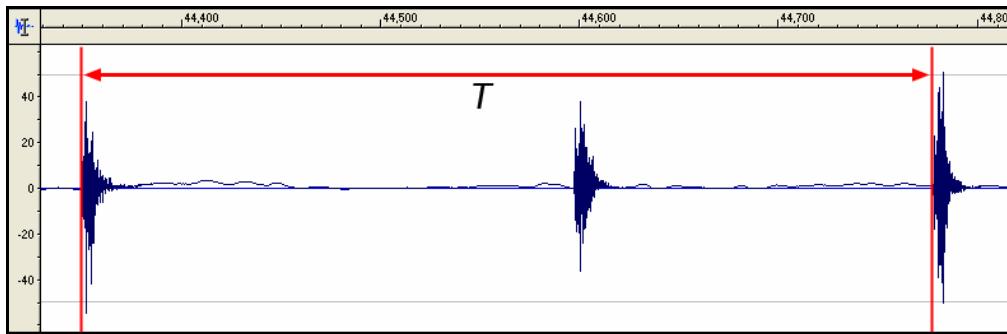
Aparat ustawiono w tryb preselekcji czasu (ustawienie Tx). Czas otwarcia migawki ustawiono na 1/500 s.

Przy małych powiększeniach (skala 1:512), wyraźnie widać momenty otwierania się i zamykania migawki (Rysunek 51). Oś pionowa stanowi poziom dźwięku w procentach, natomiast na skali poziomej widoczny jest czas w sekundach. Już na tak małym wykresie widać pewną regularność przebiegu.



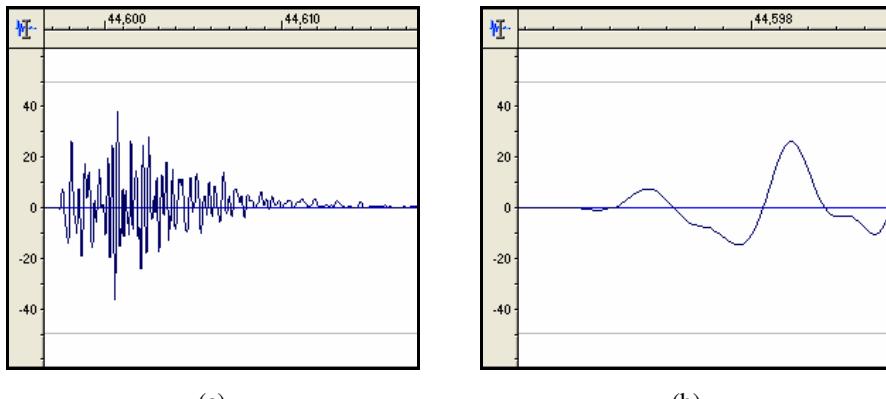
Rysunek 51. Fragment wykresu zarejestrowanej fali dźwiękowej z widocznymi dźwiękami migawki. Skala czasu 1:512.

Pierwszym spostrzeżeniem jest to, że czas otwarcia migawki aparatu (z rysunku można odczytać, że jest to ok 250 ms) nie odzwierciedla ustawionego w aparacie czasu ekspozycji ($1/500 = 2$ ms). Okazało się, że dla wszystkich czasów ekspozycji poniżej $1/4$ (250 ms), aparat domyślnie stosował stały czas otwarcia mechanicznej migawki równy ok. 250 ms. Dlatego w poniższym badaniu założono, że czas otwarcia migawki mechanicznej jest zsynchronizowany z czasem rzeczywistej rejestracji zdjęcia.



Rysunek 52. Interwał T między kolejnymi dźwiękami otwarcia migawki. Skala 1:128.

W doświadczeniu badany był czas T pomiędzy kolejnymi dźwiękami otwarcia migawki, a dokładniej czas między początkami tych dźwięków (Rysunek 52). Aby dokładnie określić czas pojawienia się dźwięku, obraz powiększono do skali 1:1, czyli takiej, w której jeden piksel obrazu odpowiadał jednej próbce badanego sygnału. Zastosowany program do analizy dźwięku umożliwiał odczytanie czasu tej próbki (względem początku całego nagrania) z dokładnością do 1 ns. Niestety nie każdy wykres dźwięku otwarcia migawki prezentował się tak idealnie jak ten na rysunku 53b. Dlatego też niepewność odczytu w praktyce wynosiła nawet 100 ns. Stanowi to jednak tylko ok. $+/-0,01\%$ otrzymanego ostatecznie interwału czasowego T , dlatego w dalszych rozważaniach niepewność tę można pominąć.



Rysunek 53. Powiększenie wykresu pojedynczego dźwięku otwarcia migawki: (a) 1:16; (b) 1:1

Odstęp czasowy wyznaczono dla 101 kolejnych próbek. Wyniki badania przedstawione zostały w tabeli 6 w aneksie.

Badania wskazują, że średni interwał między kolejnymi dźwiękami otwarcia migawki wynosi $428,85 \pm 0,64$ ms. Różnica między maksymalnym a minimalnym interwałem wynosi 1,27 ms, co stanowi 0,3% średniego interwału. Odchylenie standardowe wynosi 0,272 ms. Można więc przyjąć, że częstotliwość rejestracji zdjęć sekwencyjnych jest stała i wynosi średnio 2,33 zdjęcia na sekundę. Maksymalna niepewność w stosunku do wartości średniej wynosi 0,18%, co jest wartością bardzo małą w porównaniu do błędów wynikających z zastosowanej metody wyznaczania prędkości.

3.7.3. Podsumowanie wyników

Z badań, w których użyto metody akustycznej wynika, że średnia wartość interwału czasowego wynosi $428,85 \pm 0,64$ ms. Niestety, wartość ta różni się od wartości otrzymanej przy użyciu stopera programowego, gdzie wyniosła $433,43 \pm 0,05$ ms (Rozdział 3.7.1). Dlatego też pomiary powtórzono z wykorzystaniem stopera elektronicznego. Wyodrębniono taką sekwencję zdjęć, aby na pierwszym i ostatnim zdjęciu było widać wyraźnie czas rejestracji (wszystkie segmenty wyświetlacza znajdują się w stanie ustalonym). Niepewność odczytu oszacowano na $\pm 0,1$ s, ze względu na to, że stoper aktualizował czas na ekranie co 150 ms. Różnica czasu między pierwszym a ostatnim z 794 zdjęć wyniosła $344,1 \pm 0,1$ s, co daje średni interwał między zdjęciami równy $433,39 \pm 0,12$ ms. Wynik ten pokrywa się w granicach błędu z wynikiem uzyskanym przy pomocy stopera programowego, dlatego w dalszej części pracy przyjęto, że interwał czasowy dla aparatu Canon PowerShow S3 IS równy jest **$433,43 \pm 0,05$ s**, co daje częstotliwość akwizycji równą **$2,3072 \pm 0,0003$ Hz**.

4. Realizacja programu do analizy sekwencji obrazów

4.1. Wstęp

Program do rozpoznawania tablic rejestracyjnych i analizy ruchu został napisany w języku C++ i skompilowany do działania w systemie Windows. Narzędziem użytym do napisania programu było środowisko Microsoft Visual Studio .NET 2005. Program wykorzystuje bibliotekę OpenCV zawierającą funkcje do operacji na obrazach, zarówno te podstawowe, jak i te bardziej zaawansowane.

Zestaw ten został wybrany głównie ze względu na wysoką wydajność wynikowych programów napisanych w języku C++, oraz duży zestaw odpowiednich funkcji przetwarzania obrazów dostarczany przez bibliotekę OpenCV. Dodatkowym atutem tej biblioteki jest duża szybkość działania oferowanych przez nią funkcji, czego dowodem może być jej stosowanie w różnych systemach i programach działających w czasie rzeczywistym (np. DARPA Grand Challenge 2005 [9], SwisTrack [29]).

4.2. Opis funkcjonalny programu

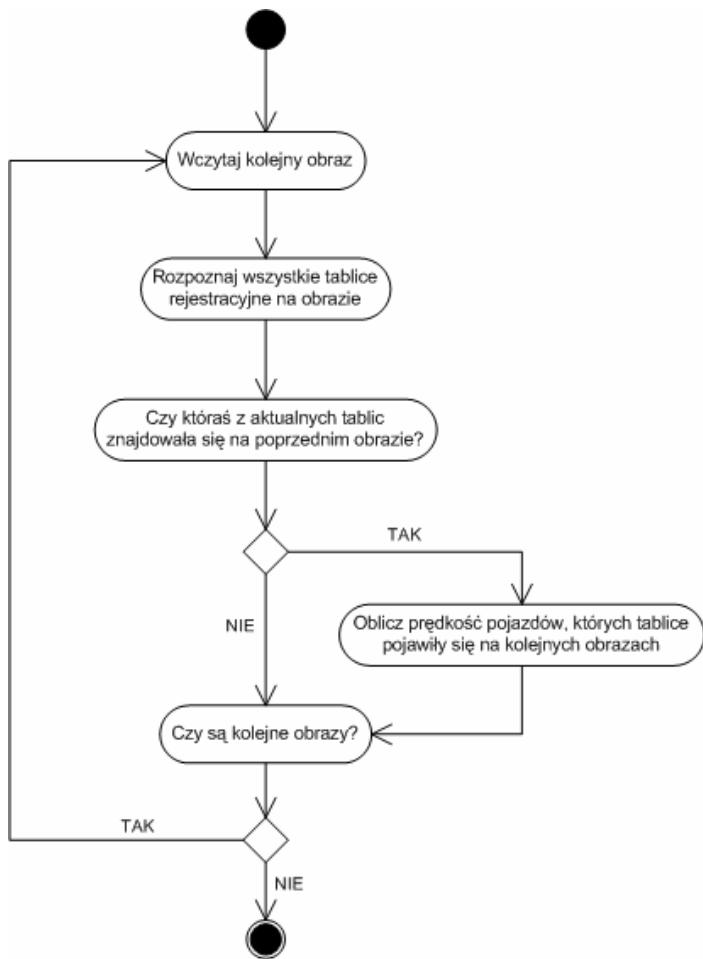
Program rozpoznaje tablice rejestracyjne pojazdów przejeżdżających po rejestrowanym fragmencie drogi, oraz wykonuje analizę ich ruchu. Zebrane dane magazynowane są w bazie danych. W ostatecznym zastosowaniu, program może wykonywać każdą inną zaprogramowaną akcję, np. wysłanie raportu o przekroczeniu prędkości, albo zgłoszenie rozpoznania skradzionego pojazdu.

Aby uruchomić rozpoznawanie, w obecnej wersji programu, należy wybrać obraz początkowy sekwencji z katalogu na dysku. Program sam pobiera kolejne obrazy bazując na nazwie pliku oraz zawartym w tej nazwie numerze obrazu.

Program posiada funkcję uczenia wzorców. Po włączeniu tego trybu, każda rozpoznana tablica jest analizowana znak po znaku. Aktualnie analizowany znak jest przedstawiany na ekranie wraz z jego najlepszym odpowiednikiem z aktualnej tablicy wzorców. Jeżeli znak został rozpoznany nieprawidłowo, można w oknie tekstowym wpisać znak odpowiadający aktualnie wyświetlzonemu znakowi, dzięki czemu znak ten zostanie dodany do tablicy wzorców. Tablica wzorców jest zapisywana na dysku w formie pliku XML.

4.3. Zasada działania programu

Zasada działania programu przedstawiona jest na poniższym diagramie. Program wczytuje kolejno zdjęcia z wybranej sekwencji. Dla każdego zdjęcia przeprowadzana jest operacja rozpoznawania wszystkich widocznych tablic rejestracyjnych. Następnie program stara się dopasować aktualnie rozpoznane tablice rejestracyjne do tych, które pojawiały się na poprzednich ujęciach, tak, aby dało się określić jaką drogę przebył pojazd, a na tej podstawie określić przybliżoną prędkość pojazdu. Rozpoznane numery tablic rejestracyjnych oraz parametry ruchu pojazdów o tych numerach wyświetlane są na ekranie.



Rysunek 54. Diagram ogólnej zasady działania programu.

4.4. Wczytywanie sekwencji obrazów

Obecna wersja programu nie posiada możliwości automatycznego pobierania danych z kamery cyfrowej. Zamiast tego program pobiera kolejne obrazy zapisane na dysku. Obrazy te powinny mieć odpowiednie nazewnictwo, tak żeby program mógł je wczytywać w odpowiedniej kolejności. W obecnej wersji, program analizuje 4 ostatnie cyfry w nazwie obrazu i na tej podstawie pobiera następujące po sobie obrazy do momentu aż nie będzie już obrazu o kolejnym numerze. Użytkownik może też ręcznie przerwać działanie programu w dowolnej chwili.

W programie nie zdecydowano się na obsługę plików wideo, ani obsługi strumieni wideo. Trzeba zauważyć, że popularne kamery cyfrowe, zarówno amatorskie, jak i te profesjonalne nie posiadają dostatecznej wysokiej rozdzielczości, aby mogły być skutecznie wykorzystane jako źródło sekwencji obrazów w opracowanym programie.

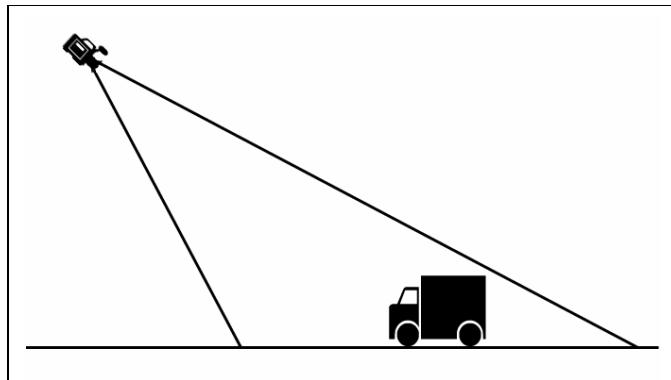
Również ogólnodostępne aparaty fotograficzne, nawet te bardziej zaawansowane, nie posiadają interfejsów pozwalających na transmitowanie rejestrowanych obrazów bezpośrednio do komputera w czasie rzeczywistym. Konieczne byłoby zbudowanie odpowiedniego interfejsu sprzętowego, co jednak wykraczało poza ramy niniejszej pracy.

4.5. Wykorzystane algorytmy – badania i rozwój

Stworzony program bazuje zarówno na istniejącej już wiedzy w dziedzinie systemów ARTR, jak i na własnych odkryciach i spostrzeżeniach. Poniższe rozdziały przedstawiają wykorzystane w programie algorytmy, jak też pokazują problemy pojawiające się przy ich wykorzystaniu, oraz sposoby rozwiązania tych problemów. Ukażane są również ich wady i zalety poszczególnych algorytmów.

4.5.1. Wyznaczanie oczekiwanej rozmiaru tablicy rejestracyjnej

Metody lokalizacji i rozpoznawania tablic rejestracyjnych wykorzystane w programie wykorzystują zależność rozmiaru tablicy na obrazie od jej położenia na tym obrazie. Metoda ta pozwala na zwiększenie dokładności lokalizacji tablic poprzez przewidywanie rozmiaru tablicy w danym miejscu obrazu.



Rysunek 55. Ustawienie kamery względem jezdni

Jeśli założy się, że jezdnia będzie rejestrowana pod pewnym kątem z góry (tak jak na rysunku 55), to będzie ona na obrazie przedstawiona w perspektywie (Rysunek 56). Pojazdy w miarę poruszania się w kierunku kamery, będą na tym obrazie pojawiać się coraz niżej i będą coraz większe. Wielkość pojazdu na obrazie będzie zależna od jego położenia względem kamery w rzeczywistości, a co za tym idzie od jego położenia na obrazie. Można przyjąć, że wielkość pojazdu na ekranie będzie pewną funkcją jego położenia pionowego na ekranie.



Rysunek 56. Przykład obrazu widzianego przez kamerę umiejscowioną tak jak na rysunku 55.

Ponieważ położenie tablicy rejestracyjnej względem pojazdu jest stałe, można przyjąć, że wielkość tablicy na obrazie będzie także pewną funkcją położenia pionowego tej tablicy na obrazie. Warto zauważyć, że metoda ta służy tylko wykrywaniu obszarów potencjalnie zawierających tablice, więc błąd wnoszony przez takie przybliżenia może być pominięty.

Założenie takie ma swoje wady i zalety. Zaletą jest niewątpliwie możliwość odpowiedniej adaptacji metod lokalizacji i rozpoznawania tablic w zależności od oczekiwanej wielkości tablicy, przez co zyskuje się na wydajności oraz skuteczności programu. Bezsprzeczną wadą jest natomiast konieczność kalibrowania programu dla konkretnego ustawienia kamery. Wada ta okazuje się mniejsza, jeśli zauważysz się, że wyznaczone parametry służą jedynie przybliżonej analizie, więc nie muszą być wyznaczane dokładnie. W trakcie eksperymentów, zauważono, że wystarczy określić maksymalne możliwe górne i maksymalne możliwe dolne położenie tablicy oraz określić np. szerokość tablicy w pikselach dla tych pozycji. Pozostałe parametry można wyznaczać bazując na proporcjonalności poszczególnych wielkości.

4.5.2. Lokalizacja tablicy rejestracyjnej – wariant I – metoda „sygnatur”

Pierwotnie zastosowana w programie metoda lokalizacji tablicy rejestracyjnej bazuje na tak zwanych sygnaturach tablic rejestracyjnych, opisanych w rozdziale 2.6.3 z pewnymi modyfikacjami zapożyczonymi z metody analizy teksturalnej. Metoda ta polega na wyszukiwaniu miejsc na obrazie, w których dochodzi do częstych zmian jasności. W praktyce sprowadza się to do wykrywania krawędzi oraz wyszukiwania obszarów o dużej gęstości krawędzi. Dodatkowym elementem zastosowanym w tej metodzie jest algorytm zależności rozmiaru tablicy na obrazie od jej pozycji na tym obrazie, opisany w rozdziale 4.5.1.

Etap 1. Przetwarzanie wstępne.

W tym etapie wykonywana jest konwersja obrazu na postać szarościową (Rysunek 58). Następnie stosowany jest algorytm rzutu jasności. Ze względu na to, że w tablicy rejestracyjnej występują ciemne znaki przedzielone jasnymi przerwami, można wykryć te miejsca poprzez zastosowanie rzutu jasności w liniach pionowych dla każdego piksela obrazu. W tym momencie likwiduje się kontrastowe obszary, które mają niższą wysokość niż wysokość rzutu jasności.

$$\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{matrix}$$

Rysunek 57. Maska filtru uśredniającego pionowego

W praktyce taki rzut jasności dla każdego piksela sprowadza się do filtracji filtrem uśredniającym pionowym z maską przedstawioną na rysunku 57, o wysokości zależnej od wysokości tablicy wyliczonej na podstawie metody przedstawionej w rozdziale 4.5.1. Filtr taki rozmywa krawędzie poziome, a wyostrza krawędzie pionowe.

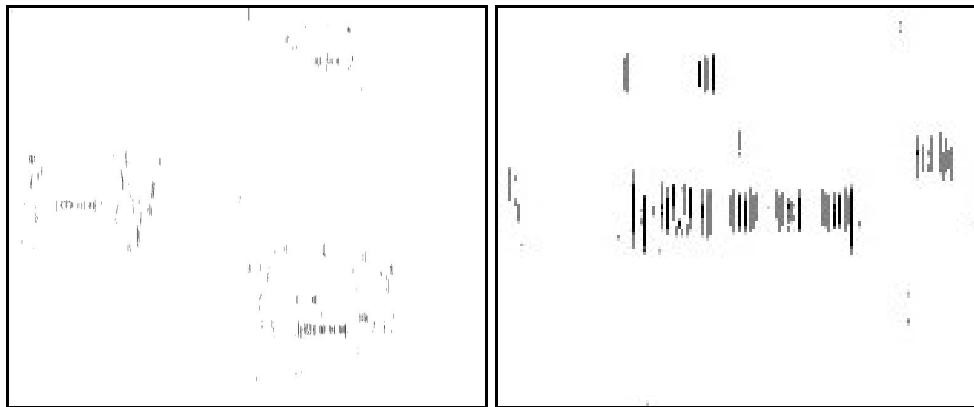


Rysunek 58. Obraz źródłowy w skali szarości.



Rysunek 59. Wynik zastosowania filtra uśredniającego z rys. 57.

Następnie przeprowadzane jest progowanie adaptacyjne. Parametry progowania są tak dobrane, aby na obrazie pozostały elementy tylko o najwyższej kontraste. Wynik progowania przedstawiony jest na rysunku 60.



Rysunek 60. Wynik progowania adaptacyjnego.

Jak widać, najwięcej tych miejsc pojawiło się w obszarze tablic rejestracyjnych, w miejscach gdzie pojawiają się jasne przerwy między literami. Niestety wykryte zostały też inne miejsca o wysokim kontraście. Aby wyznaczyć obszary tablic rejestracyjnych, należy wyszukać miejsca, w których kontrast zmienia się często i regularnie.

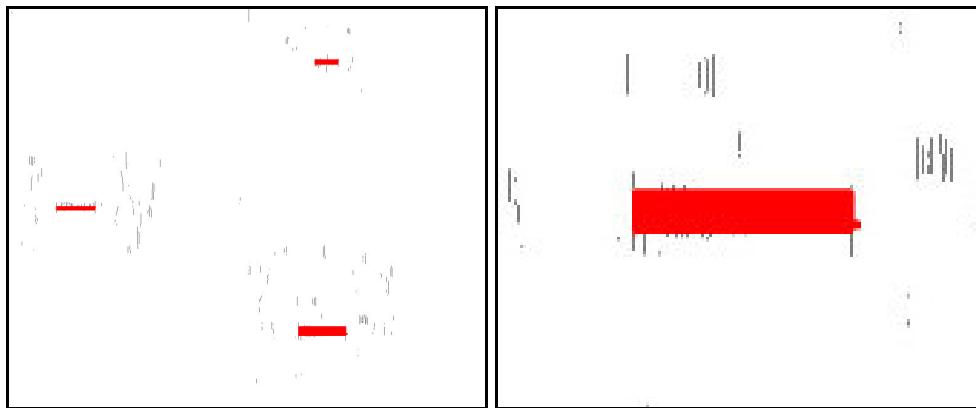
Etap 2. Wyszukiwanie obszarów o dużym zagęszczeniu krawędzi.

Na tym etapie program skanuje kolejne linie obrazu i wyszukuje blisko leżące krawędzie. Jeżeli dwie kolejne krawędzie zlokalizowane są w pewnej niewielkiej odległości D , to pierwsza z tych krawędzi jest zapamiętywana jako tymczasowy początek obszaru tablicy rejestracyjnej T_p . Jeżeli w wyniku dalszej analizy program znajdzie co najmniej N takich krawędzi (N – parametr definiowalny, określany eksperymentalnie), a kolejna krawędź znajduje się w dużej odległości (większej niż D), to program zapisuje pozycję ostatniego konturu T_k jako koniec obszaru potencjalnie zawierającego tablicę. W przeciwnym przypadku, jeżeli liczba znalezionych bliskich krawędzi jest mniejsza niż N , program ignoruje ten obszar i rozpoczyna poszukiwania od nowa od miejsca ostatnio znalezionego konturu. Program pomija również potencjalne obszary, które są węższe niż W_{min} i szersze niż W_{max} .

Maksymalna odległość D , która może dzielić te krawędzie jest wyznaczana eksperymentalnie. Dodatkowo program wykorzystuje metodę przewidywania rozmiaru tablicy do określenia tej odległości. Podobnie jest w przypadku wartości W_{min} i W_{max} .

Wynik operacji wykrywania obszarów o dużym zagęszczeniu konturów przedstawiony jest na rysunku 61. Kolejne znalezione obszary zaznaczane były

czerwoną linią poziomą. Jak widać linie te połączyły się w jeden obszar. Ani szerokość, ani wysokość tego obszaru nie musi być jednak zgodna z wysokością tablicy.



Rysunek 61. Wynik operacji wykrywania miejsc o dużym zagęszczeniu konturów.

Etap 3. Wyznaczanie obszaru tablicy rejestracyjnej

W poprzednim etapie wyznaczone zostały granice, w których może zawierać się tablica rejestracyjna. Jednak ze względu na wiele czynników, obszar ten może nie być wykryty idealnie. Ponadto, jak można zauważyć na rysunku 61b, obszar ten ma niejednorodne granice. W tym celu niezbędne jest kolejno:

- wyznaczenie środka obszaru
- określenie obszaru tablicy rejestracyjnej.

Wyznaczenie środka obszaru nie jest trywialne. Obszar z rysunku 61 jest dość regularny, ale może się zdarzyć, że wykryty obszar nie będzie aż tak regularny. Ponieważ obszar ten jest przechowywany w postaci nieposortowanych linii poziomych (w tej samej linii obrazu mogą występować dwie tablice), w dodatku posiadających różne punkty początkowe i końcowe, niezbędne jest zastosowanie odpowiedniego algorytmu.

Zastosowany algorytm sprawdza położenie tych linii i jeżeli dana linia leży w pewnej bliskiej odległości (określonej eksperymentalnie) od drugiej, to linie te są umieszczane w tej samej grupie linii. Środek obszaru jest środkiem grupy i jest wyliczany jako średnia arytmetyczna punktów początkowych i końcowych poszczególnych linii w tej grupie.

Może się zdarzyć, że dla jednej tablicy rejestracyjnej program znajdzie dwa obszary rozdzielone poziomą przerwą. W takim przypadku należy przyjąć pewien margines dopuszczalnej przerwy pomiędzy obszarami, kiedy to te dwa obszary powinny

być połączone. Istnieje ryzyko, że zostaną połączone dwa obszary nienależące do jednej tablicy, jednak:

- dwie tablice nigdy nie znajdą się w tak bliskiej odległości od siebie, więc taki przypadek można od razu wykluczyć.
- algorytm znajdujący obszar tablicy jest w dużej mierze skuteczny, a więc jeśli znalezione dwa obszary leżą blisko siebie i jeden z nich ma wysokość zbliżoną do oczekiwanej w tym miejscu rozmiaru tablicy rejestracyjnej, a połączenie tego obszaru z drugim obszarem spowoduje, że ta wysokość będzie znacznie większa od oczekiwanej, wtedy z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć że jeden z obszarów jest obszarem właściwym dla tablicy i nie należy dodawać drugiego obszaru, tylko analizować oba osobno. Przykład takich obszarów przedstawiony jest na rysunku 62.



Rysunek 62. Dwa blisko leżące obszary, z których jeden nie należy do tablicy rejestracyjnej.

Po znalezieniu środka obszaru potencjalnie zawierającego tablicę, obszar tablicy wyznaczany był wokół tego środka na podstawie techniki wyznaczania oczekiwanej rozmiaru tablicy na obrazie (rozdział 4.5.1).

W wyniku lokalizacji tablic rejestracyjnych z rysunku 58 otrzymano trzy obszary przedstawione na rysunku 63. W tym przypadku wszystkie tablice zostały wykryte prawidłowo oraz nie było żadnych fałszywych obszarów.



Rysunek 63. Obszary wykryte przy pomocy metody sygnatur.
Skala została zachowana.

Rezultaty.

W czasie testów okazało się jednak, że przedstawiona metoda działa wolno, oraz jest zawodna. O ile błędnie wykryte obszary mogą być zweryfikowane w kolejnych etapach rozpoznawania, o tyle prędkość działania jest dość istotną wadą.

Do testowania programu wykorzystano komputer klasy Pentium 4 1,8 GHz. Obrazy wejściowe miały rozdzielcość 2560 x 1920 pikseli.

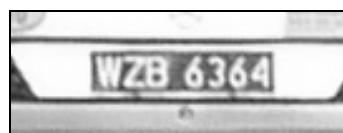
Najbardziej czasochłonną czynnością było wyszukiwanie przejść jasności na obrazie oraz łączenia ich w grupy. Czas ten wynosił średnio 2 sekundy, przez co cały proces rozpoznania trwał nawet 3 sekundy. W przypadku systemów działających w czasie rzeczywistym z szybkością przetwarzania kilku klatek na sekundę, taka metoda jest stanowczo za wolna.

Zawodność metody polegała na wykrywaniu tablic tam gdzie ich rzeczywistości nie było. Często były wykrywane takie obiekty jak reflektory, atrapy wlotu powietrza, elementy karoserii, napisy inne niż na tablicach rejestracyjnych (Rysunek 64). Niestety zdarzały się też sytuacje, gdy tablice nie były wykrywane w miejscach gdzie się one faktycznie znajdują. Najczęściej przyczyną był zbyt niski kontrast, np. z powodu zabrudzenia tablicy. Zwiększenie czułości poprawiało skuteczność rozpoznawania tablic o niskim kontraście, niestety równocześnie gwałtownie rosła liczba błędnie sklasyfikowanych obszarów.



Rysunek 64. Błędnie wykryte obszary.

Do zalet metody warto zaliczyć prawidłowe rozpoznawanie starych tablic rejestracyjnych bez konieczności modyfikacji metody (Rysunek 65).



Rysunek 65. Wynik lokalizacji w przypadku starej tablicy rejestracyjnej.

W wyniku zaistnienia powyższych problemów podjęto się optymalizacji przedstawionego w tym rozdziale algorytmu. Rezultatem było opracowanie innego algorytmu lokalizacji tablic (rozdział 4.5.5).

4.5.3. Wydzielanie znaków tablicy rejestracyjnej – wariant I – rzut jasności

Kolejnym etapem działania programu po wykryciu obszaru potencjalnie zawierającego tablicę jest precyzyjne określenie położenia znaków tej tablicy. Zastosowano tu technikę rzutu jasności omówioną w rozdziale 2.7.2.

Największą trudnością w tej metodzie jest wyznaczenie dokładnych granic tablicy rejestracyjnej. Tak jak było wspomniane w rozdziale 2.7.2, wyznaczony obszar tablicy rejestracyjnej jest większy niż obszar samych liter tablicy. Wynika to głównie z zawodności metod lokalizacyjnych, przez co wykryty obszar jest powiększany o pewien margines bezpieczeństwa. Jednak zwiększenie obszaru powoduje, że metoda rzutu jasności nie może być zastosowana bezpośrednio, ponieważ niejednorodność obrazu pojazdu w pobliżu tablicy powoduje spore zniekształcenie tego rzutu. Dlatego też należało opracować metodę precyzyjnego określenia górnej i dolnej granicy znaków tej tablicy. Do tego celu wykorzystano także metodę rzutu jasność, ale w tym razem w liniach poziomych. Poszczególne etapy tej metody opisane zostały poniżej.

Etap I. Wyznaczanie granic pionowych tablicy.

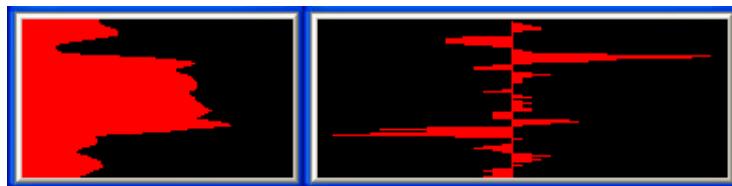
W pierwszym etapie, wyznaczany jest poziomy rzut jasności dla całego obszaru. Ze względu na to, że tablica rejestracyjna zajmuje większość wyznaczonego obszaru, można przypuszczać, że jasne przerwy występujące ponad literami oraz pod literami, sąsiadując z ciemnymi literami oraz ciemną ramką tablicy rejestracyjnej, będą widoczne na wykresie jasności. Tak też się dzieje, choć bezpośrednie zaobserwowanie tych zmian może być trudne. Akurat w przypadku przykładu rysunku 66 granica tablicy jest bardzo dobrze widoczna ze względu na sąsiedztwo ciemnej karoserii pojazdu.



Rysunek 66. W lewej części obrazu – wyznaczony obszar tablicy. W prawej części jego rzut poziomy.

Aby wykryć granice tablicy należy znaleźć miejsca, w których dochodzi do szybkich zmian wykresu. Możliwe jest to na przykład poprzez stworzenie gradientu tego przebiegu (prawa część rysunku 67). W miejscach, w których dochodzi do

sztywnych zmian wykresu rzutu jasności, na wykresie gradientu można zaobserwować dwa wysokie „piki”.



Rysunek 67. Gradient rzutu poziomego. Po lewej rzut poziomy z rysunku 66, po prawej gradient tego rzutu.

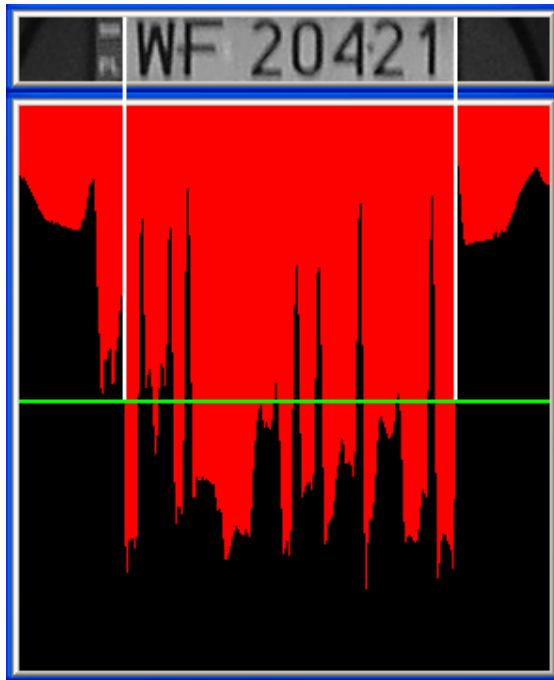
Aby znaleźć pionowe granice znaków tablicy, wyznaczono eksperymentalnie pewną granicę. Granica ta została zaznaczona kolorem zielonym w prawej części rysunku 68. Następnie wykres analizowany jest od środka w górę i w dół. Miejsca, w których przekracza on założony próg, są szukanymi pozycjami granicznymi znaków tablicy rejestracyjnej. Na rysunku 68 zaznaczono je liniami koloru białego.



Rysunek 68. Granice pionowe tablic. (a) Obszar oryginalny; (b) gradient, z zaznaczonym prógiem (zielony) i granicami tablicy (biały)

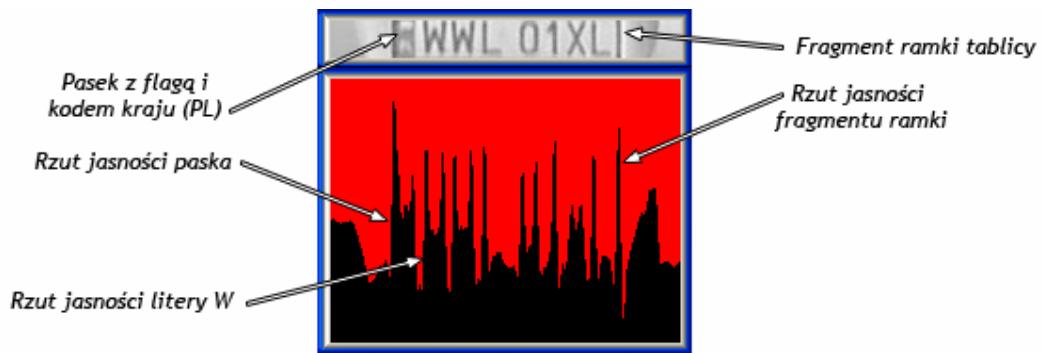
Etap 2. Wyznaczanie granic poziomych tablicy.

Kolejnym etapem po wykryciu granic pionowych znaków jest określenie granic poziomych tablicy rejestracyjnej, a następnie segmentacja na obszary odpowiadające poszczególnym znakom. Wyznaczanie granic poziomych może się odbywać podobnie jak w przypadku wyznaczania granic pionowych. Przykładowy rzut jasności przedstawiony jest na rysunku 69. Widać wyraźnie, w którym miejscu zaczyna się obszar tablicy rejestracyjnej.



Rysunek 69. Pionowy rzut jasności z zaznaczonym progiem (linia zielona) i wyznaczonymi granicami tablicy (linie białe).

Niestety, powyższy sposób jest bardzo skuteczny jedynie w przypadku, gdy otoczenie tablicy rejestracyjnej jest ciemne. Gdy otoczenie jest jasne, a sama tablica ma mały kontrast (zabrudzenie), występują pewne kłopoty z określeniem takiego progu, przy którym granice poziome tablicy będą prawidłowo wyznaczone. Przypadek tablicy, która występuje na jasnym tle, przedstawiono na rysunku 70. Widać, że wykres dla paska z flagą i literami PL jest bardzo podobny do wykresu dla litery „W”. Również szerokość tych obszarów jest zbliżona. Natomiast z prawej strony tablicy rejestracyjnej za ciągiem liter „01XL” znajduje się fragment ramki tablicy rejestracyjnej, która może być mylona z literą „I”. W obu przypadkach istnieją wprawdzie niewielkie różnice w rzucie jasności, ale bazowanie na nich może doprowadzić do błędów. Zdawać by się mogło, że analiza składniowa mógłby rozwiązać ten problem, jednak wprowadzona w 2006 zmiana rozporządzenia o tablicach rejestracyjnych [23], wprowadza możliwość stosowania 8-znakowych numerów rejestracyjnych. W takim przypadku można mieć spore wątpliwości czy wspomniany wyżej fragment ramki jest ramką czy ósmym znakiem tablicy.



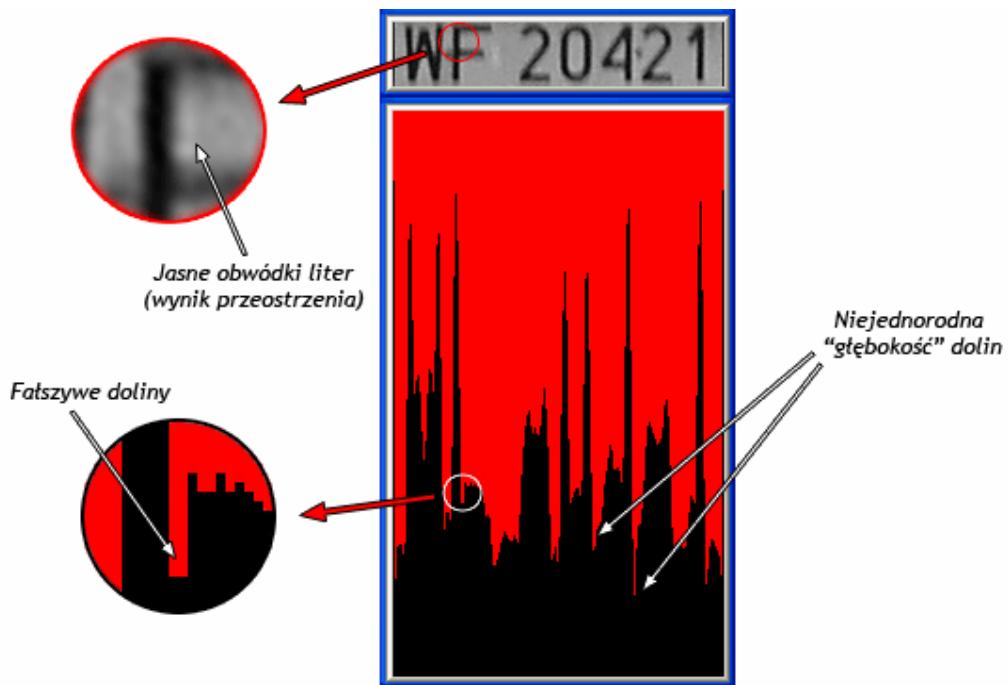
Rysunek 70. Pionowy rzut jasności dla tablicy znajdującej się na jasnym tle.

Etap 3. Segmentacja znaków

W tym etapie po raz kolejny wykorzystywana jest metoda rzutu jasności. W wyniku analizy dolin w rzucie jasności można wyodrębnić obszary poszczególnych znaków. Niestety, tak jak widać na rysunku 71, pojawiają się tutaj kolejne problemy.

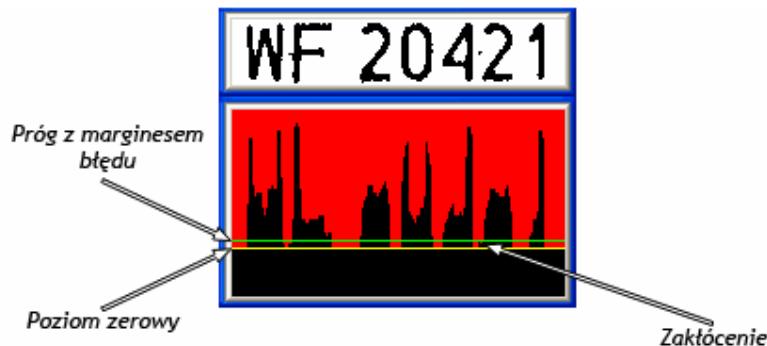
Po pierwsze, aparaty często stosują wbudowane metody wyostrzania obrazu, przez co na krawędziach ciemnych obiektów pojawiają się jasne obwódki. Jest to tak zwany efekt „przeostrzenia”. Jasne obwódki powodują obniżenie wykresu jasności w tym miejscu, do tego stopnia, że mogą powstawać fałszywe doliny. Ze względu na to, że przeostrzenie jest wynikiem algorytmów „zaszytych” w elektronice aparatu, nie ma możliwości zlikwidowania tego problemu.

Po drugie, różnica jasności przerw między znakami powoduje, że głębokość dolin odpowiadająca tym przerwom może być bardzo różna. Okazuje się nawet, że fałszywe doliny, o których wspomniano w poprzednim akapicie, mogą osiągać głębokość porównywalną z głębokością dolin odpowiadających przerwom. W takim przypadku mogą być brane za przerwy i powodować błędную segmentację. Sytuacja taka jest trudna do wykrycia i korekcji.



Rysunek 71. Problemy występujące przy segmentacji liter metodą rzutu jasności.

W związku z przedstawionymi wyżej problemami, zamiast analizować rzut jasności obrazu szarościowego, analizuje się rzut obrazu binarnego. Wynik operacji progowania adaptacyjnego obszaru tablicy przedstawiono w górnej części rysunku 72. W dolnej części tego rysunku widoczny jest rzut jasności. Jak widać, głębokość „dolin” została sprowadzona do jednego poziomu. Jednak nadal istnieje możliwość pojawiения się na obrazie binarnym ciemnych obszarów niezwiązanych ze znakami tablicy. Najczęściej są to elementy mocujące, brud lub duże owady. Zakłócenie takie powoduje, że wykres rzutu jasności w między znakami może nie przebiegać na poziomie zerowym. Dlatego też wprowadza się pewien margines błędu (Rysunek 72).



Rysunek 72. Rzut jasności dla obrazu binarnego.

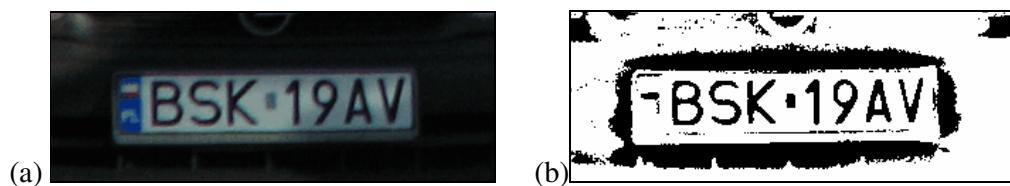
4.5.4. Wydzielanie znaków tablicy rejestracyjnej – wariant II – metoda konturowa.

W związku z problemem precyzyjnej detekcji obszaru tablicy rejestracyjnej opisany w poprzednim rozdziale, zdecydowano się na zastosowanie alternatywnej metody wydzielania znaków tablicy. Ze względu na to, że znaki te są odseparowane od otoczenia i od samych siebie, dlatego do ich detekcji można wykorzystać metodę elementów połączonych. Metoda ta jest dokładniej opisana w rozdziale 2.7.3. Pomimo iż z pozoru wygląda na bardziej skomplikowaną od metody teksturalnej, to jednak w praktyce działa ona szybciej.

Poszczególne etapy zaimplementowanej w stworzonym programie odmiany tej metody, przedstawione są poniżej. Ze względu na operowanie konturami elementów połączonych, będzie dalej nazywana **metodą konturową**.

Etap 1. Przetwarzanie wstępne.

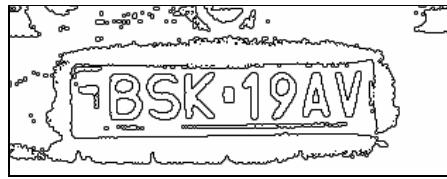
Segmentacja obrazu metodą elementów połączonych wymaga użycia obrazu binarnego, dlatego pierwszą operacją wykonywaną przez program jest progowanie obszaru tablicy otrzymanego w wyniku lokalizacji. Wykonywane jest progowanie adaptacyjne, ze względu na to, że na obraz tablicy może nie być jednorodny (Rozdział 3.3.6). Parametry progowania dobrane są eksperymentalnie.



Rysunek 73. Obszar wykryty przez metodę lokalizacyjną:
(a) w skali szarości; (b) po progowaniu adaptacyjnym

Etap 2. Wykrywanie konturów

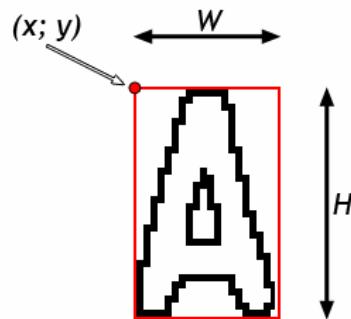
Kolejnym krokiem jest wykrywanie konturów. Można to zrealizować poprzez implementację którejś z metod analizy elementów połączonych, ale w stworzonym programie użyto do tego jednej z funkcji biblioteki OpenCV – `cvFindContours()`. W wyniku działania tej funkcji otrzymuje się listę konturów, którą można przedstawić tak na rysunku 74.



Rysunek 74. Kontury wykryte przez funkcję cvFindContours().

Etap 3. Klasyfikacja wstępna konturów

Kolejnym krokiem jest klasyfikacja konturów. Pozostawia się jedynie tylko te kontury, które potencjalnie mogą być znakami tablicy rejestracyjnej. Aby ułatwić analizę, dla każdego konturu wyznacza się jego prostokąt otaczający. Ilustracja takiego prostokąta przedstawiona jest na rysunku 75. Boki tego prostokąta są równoległe do brzegów ekranu oraz przylegają do najbardziej wysuniętych punktów konturu.



Rysunek 75. Prostokąt otaczający

Wstępna klasyfikacja konturów odbywa się na dwóch zasadach:

- Wysokość konturu H nie może być większa niż próg H_{max} , oraz nie może być mniejsza niż próg H_{min} .
- Stosunek długości boków W/H nie może być większy niż próg A_{max} i nie może być mniejszy niż A_{min} .

Wartości progów H_{min} , H_{max} , A_{min} , A_{max} , wyznaczone zostały eksperymentalnie.

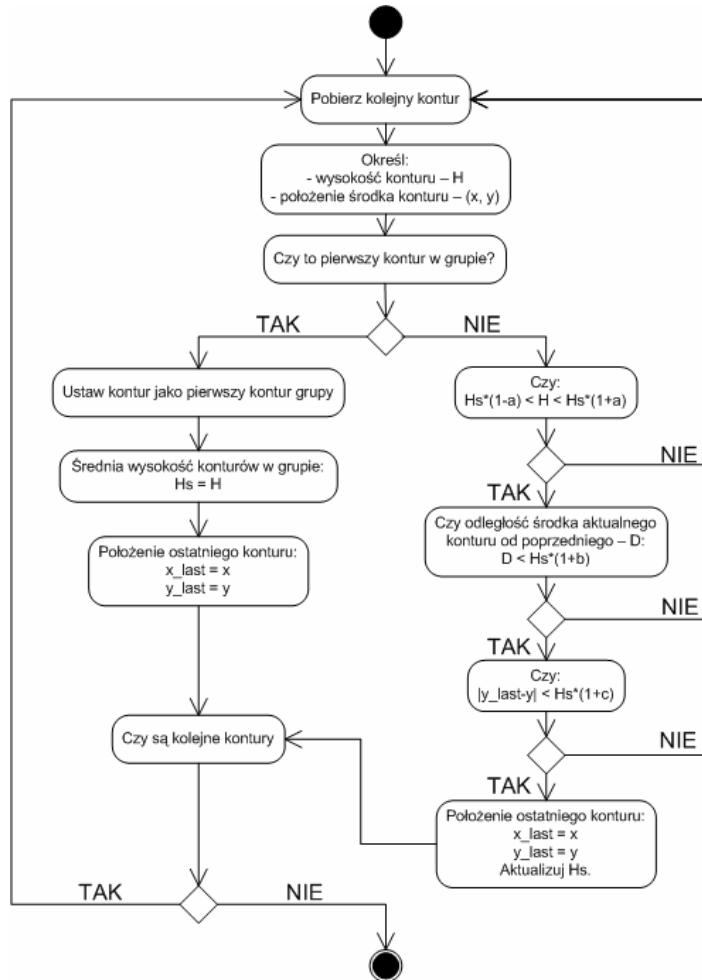
Etap 4. Sortowanie konturów

Znaki na tablicy rejestracyjnej umieszczone są od strony lewej do prawej. Dlatego kolejnym etapem segmentacji jest sortowanie wstępnie zaklasyfikowanych konturów względem współrzędnej X .

Etap 5. Grupowanie konturów

Ostatnim etapem segmentacji, jest grupowanie konturów według pewnych założonych kryteriów. Ze względu na to, że numer tablicy rejestracyjnej jest napisem składającym się z blisko siebie leżących, ułożonych w jednej linii, równej wysokości znaków, zdecydowano się zastosować następujące kryteria grupowania (stosowane wg podanej kolejności):

- wysokość konturów w grupie może się różnić o maksymalną wartość procentową a .
- odległość między kolejnymi konturami w grupie nie może być większa niż b pomnożone przez wysokości tych konturów.
- środki konturów muszą leżeć w linii prostej z tolerancją γ wyrażoną w procentach.
- liczba konturów musi być większa niż N .



Rysunek 76. Diagram algorytmu grupowania konturów.

Pierwsze 3 parametry zostały dobrane doświadczalnie, natomiast minimalna liczba znaków N wg polskiego prawa to 5 (dla tablicy indywidualnej – 2 znaki wyróżnika województwa i 3 znaki indywidualne) [23]. Prawidłowy dobór pierwszych 3 parametrów pozwala praktycznie w 100% na tym etapie wyodrębnić tylko jedną grupę konturów, które odpowiadają poszczególnym znakom rejestracji. Dodatkowo kontury te są już posortowane od lewej do prawej.

W przypadku, gdy badany obszar nie zawiera tablicy rejestracyjnej, żadna grupa konturów nie zostanie znaleziona. W takim przypadku program ignoruje ten obszar.

4.5.5. Lokalizacja tablicy rejestracyjnej – wariant II – metoda konturowa

W trakcie optymalizacji algorytmu lokalizacji, zauważono, że metoda konturowa wyszukiwania znaków tablicy, opisana w poprzednim rozdziale, działa stosunkowo szybko nawet dla dużych obszarów. Postanowiono zastosować ją do całego obrazu. Okazało się, że jest ona co najmniej kilkukrotnie szybsza od wariantu I (Rozdział 4.5.2), skracając czas potrzebny na odnalezienie tablic na ekranie do kilkuset milisekund. Dodatkową zaletą tej metody jest to, że od razu otrzymuje się precyzyjnie wyznaczone obszary tablic wraz z ich podziałem na podobszary odpowiadające poszczególnym znakom. Dodatkową zaletą jest niewielki odsetek błędnie zlokalizowanych tablic. Czas całego procesu rozpoznawania tablic na obrazie skrócił się do ok. 1 sekundy.

Ze względu na to, że tablice rejestracyjne na obrazie są różnej wielkości, użycie stałych parametrów progowania adaptacyjnego, w szczególności parametry definiującego rozmiar otoczenia, nie jest rozwiązaniem optymalnym. Znaczne lepsze wyniki, w szczególności zwiększoną wykrywalność tablic, osiągnięto dzieląc obraz w pionie na kilka części i dobierając rozmiar otoczenia indywidualnie dla każdego obszaru. Dobór ten przeprowadzono eksperymentalnie, choć prawdopodobnie również tutaj można by użyć algorytmu wyznaczania oczekiwanej rozmiaru tablicy rejestracyjnej opisanego w rozdziale 4.5.1.

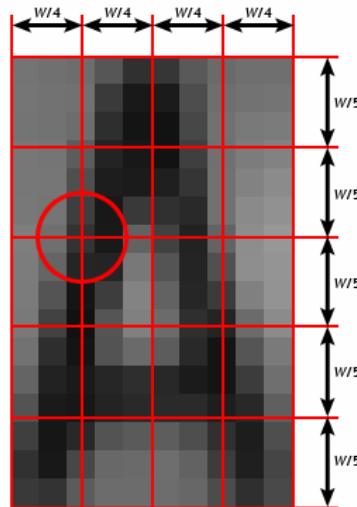
4.5.6. Rozpoznawanie znaków

Do rozpoznawania znaków zastosowano metodę szablonów, znaną także pod nazwą analizy cech gęstościowych (Rozdział 2.8.3). Obszar znaku jest dzielony równomiernie w pionie i w poziomie, dzięki czemu otrzymuje się podział na siatkę

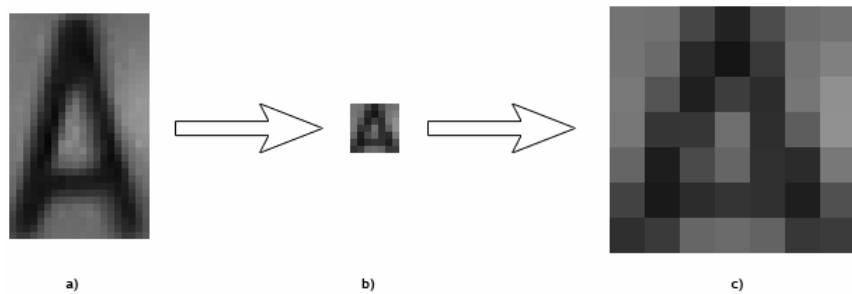
podobszarów. Dla każdego podobszaru liczona jest suma jasności wszystkich pikseli należących do tego podobszaru. Następnie wyniki są normalizowane i porównywane z wzorcami. Poszczególne etapy tej metody zostały szczegółowo opisane poniżej.

Etap 1. Podział na podobszary.

Obszar znaku jest dzielony na równe podobszary. Ze względu na to, że linia podziału może się znaleźć po środku piksela (zaznaczono kółkiem na rysunku 77), dlatego do liczenia sumy jasności pikseli, niezbędne byłoby zastosowanie algorytmu zliczającego jedynie odpowiednią, proporcjonalną część jasności tego piksela. Zamiast pisać własne algorytmy liczenia sumy jasności z uwzględnieniem podzielonych pikseli, zastosowano funkcję skalującą z biblioteki OpenCV – **cvResizeImage()**. Obszar jest przeskalowywany do rozmiaru równego liczbie podziałów w poziomie i pionie, dla przykładu z rysunku 77, jest to 4x5 pikseli (4 podziały w poziomie i 5 w pionie), a na rysunku 78 jest to 7x7. Kwestia proporcjonalnego podziału wartości pikseli znajdujących się fragmentarnie w kilku obszarach rozwiązano stosując specjalną metodę interpolacji oferowaną przez OpenCV (opcja **CV_INTER_AREA** w parametrach funkcji skalującej).



Rysunek 77. Podział obszaru znaki na równe podobszary.



Rysunek 78. Operacja wyznaczania cech gęstościowych: (a) obszar oryginalny; (b) obszar po zmianie rozmiaru do 7×7 pikseli przedstawiony w skali 1:1; (c) obszar 7×7 przedstawiony w skali 5:1

Ponieważ podział obszaru ma duży wpływ na późniejszą dokładność rozpoznania znaku, przebadano następujące podziały: 3×3 , 4×4 , 5×5 , 7×7 oraz 9×9 . Eksperymentalnie ustalono, że najlepsze rezultaty uzyskuje się dla siatki 7×7 . Siatka 5×5 jest za mało szczegółowa, natomiast 9×9 jest natomiast zbyt szczegółowa i powoduje błędy w przypadku niedokładnego wyznaczenia obszaru znaku.

Etap 2. Normalizacja.

Aby wektory gęstości mogły być efektywnie porównane ze sobą, muszą być znormalizowane. Normalizację przeprowadza się „przeskalowując” wartości wektora gęstości tak, aby najmniejszy element otrzymał wartość 0, a największy element otrzymał wartość 1000. Algorytm normalizacji przedstawiony jest poniżej.

```

 $e_{\min} = \min(G)$ 
 $e_{\max} = \max(G)$ 
for  $i = 0 : \text{sizeof}(G)$ 
 $G_i = \frac{G_i - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \cdot 1000$ 
end

```

gdzie: G – wektor gęstości; $\min(G)$, $\max(G)$ – operatory zwracające wartość odpowiednio najmniejszego i największego elementu wektora G ;

Etap 3. Wyszukiwanie odpowiadającego wzorca.

Wzorce zapisane są jako tablica wektorów gęstości utworzonych na podstawie znaków wzorcowych zawartych w Rozporządzeniu Ministra dotyczącym tablic rejestracyjnych [23]. Okazało się, że wystarczy zdefiniować po jednym wzorcu dla

każdego znaku, aby osiągnąć wysoką dokładność rozpoznawania. Aby zwiększyć dokładność, dla znaków B, 8 oraz D, zastosowano po jednym dodatkowo wzorca. Te dodatkowe wzorce zdefiniowane zostały na podstawie obrazów rzeczywistych znaków. W ostateczności w czasie testów program korzystał z 38 wzorców.

Zastosowana w programie metoda odczytywania znaku polega na wyszukiwaniu najbardziej zbliżonego wzorca w tablicy wzorców. Tablica wzorców G składa się z M wektorów wzorcowych G_k . Każdy wektor G_k odpowiada jednemu znakowi, ale jeden znak może mieć więcej niż jeden wzorzec. Wyszukiwanie wektora wzorcowego najbardziej zbliżonego do wektora badanego polega na wyznaczaniu odległości euklidesowej D od każdego z wektorów wzorcowych, a następnie na wyborze tego wektora wzorcowego, którego odległość euklidesowa do badanego wektora jest najmniejsza.

for $k = 1 : M$

$$D_k = \sqrt{\sum_{i=0}^N (G_{k,i} - W_i)^2}$$

end

Ostatecznie m jest indeksem najbliższego wzorca, jeśli $D_m = \min(D)$.

gdzie: M – liczba wzorców; D_k – odległość euklidesowa badanego wektora od k -tego wzorca; $G_{k,i}$ – i -ty element k -tego wektora wzorcowego; W_i – i -ty element badanego wektora; $\min(D)$ jest operatorem zwracającym minimalną wartość wektora D .

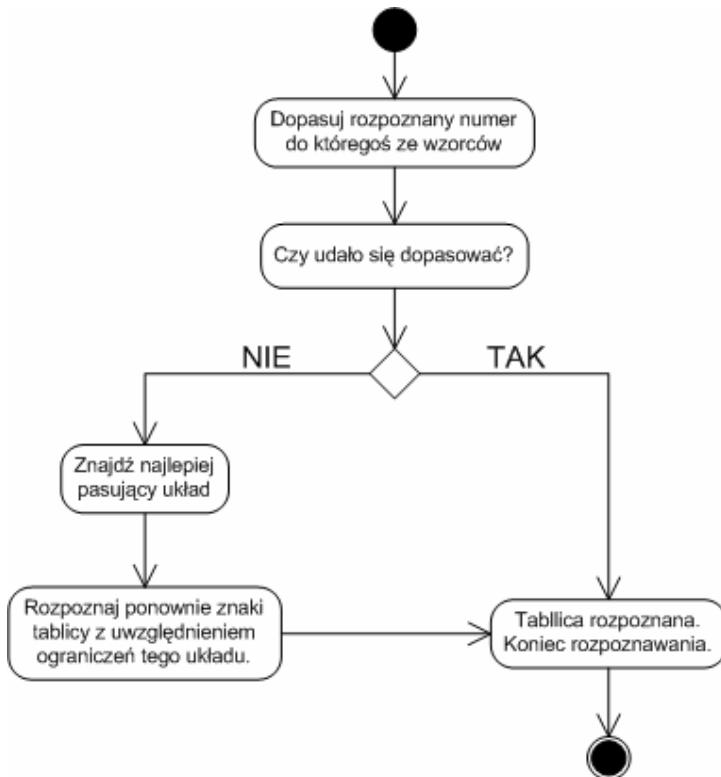
Dodatkowo, ze względu na to, że nie wszystkie litery w tablicy rejestracyjnej mogą pojawiać się w danej pozycji w numerze rejestracyjnym, przewidziano możliwość wyszukiwania wśród pewnych zdefiniowanych zestawów wzorców. Więcej szczegółów na ten temat znajduje się w następnym rozdziale dotyczącym analizy składniowej numerów rejestracyjnych (Rozdział 4.5.7).

4.5.7. Analiza składniowa numerów rejestracyjnych wraz z korekcją

W stworzonym programie zastosowano analizę składniową wraz z korekcją dla nowych polskich tablic rejestracyjnych. Analiza składni starych tablic została pominięta, głównie dlatego, że program w obecnej wersji ich nie wykrywa. Korekcja odbywa się poprzez sprawdzenie, czy dane znaki mogą występować na danych miejscach w numerze rejestracyjnym. Dzięki znajomości układów znaków jakie mogą się pojawiać na tablicach (Rozdział 2.2.2), można zbudować algorytm, który będzie

sprawdzał poprawność numeru i jeśli numer nie będzie pasował do żadnego z układów, to program będzie starał się dopasować znaki do najbardziej pasującego układu. Najbardziej pasujący układ to taki, który zawiera najmniej znaków występujących na nieprawidłowych pozycjach.

Diagram omówionego wyżej algorytmu korekcji przedstawiony jest na rysunku 79.



Rysunek 79. Diagram algorytmu korekcji ze względu na składnię.

Warto jednak znać wady stosowania korekcji znaków na postawie składni. Otóż mogą one powodować błędy, „poprawiając” tak naprawdę właściwie rozpoznane znaki. Może się to zdarzyć np. w przypadku tablic zagranicznych. Jednak nie tylko. Okazuje się, że do obiegu w Polsce mogą również zostać wprowadzone tablice „nielegalne”. Według nieoficjalnej strony „Polskie Tablice Rejestracyjne” [19], tablice nielegalne to takie, które zostały wydane wbrew Rozporządzeniu Ministra w sprawie rejestracji pojazdów. Chodzi tu szczególnie o tablice, które w wyróżniku pojazdu mają literę ze zbioru liter niedozwolonych (Rozdział 2.2.2).

4.5.8. Wyznaczanie prędkości pojazdów

Wyznaczanie prędkości pojazdów wymaga określenia położenia danego samochodu na co najmniej dwóch kolejnych zdjęciach. Oczywiście, im więcej zdjęć, tym większa pewność prawidłowego określenia prędkości.

Tak jak wspomniano w rozdziale 3.4, kamera jest ustawiona w taki sposób, aby nawet szybko poruszające się samochody zostały zarejestrowane co najmniej dwukrotnie, a przy tym znaki tablic rejestracyjnych na wszystkich obrazach były wyraźnie widoczne.

Niestety, precyzyjne określenie położenia pojazdu na zdjęciach jest bardzo trudne, z różnych względów, począwszy od przesłaniania się pojazdów, przez co nie widać ich pełnych konturów, a skończywszy na cieniach pojazdów, które mogą być mylnie interpretowane jako kontury tychże pojazdów. Dlatego zdecydowano się na wyznaczanie położenia pojazdu na podstawie jego tablicy rejestracyjnej.

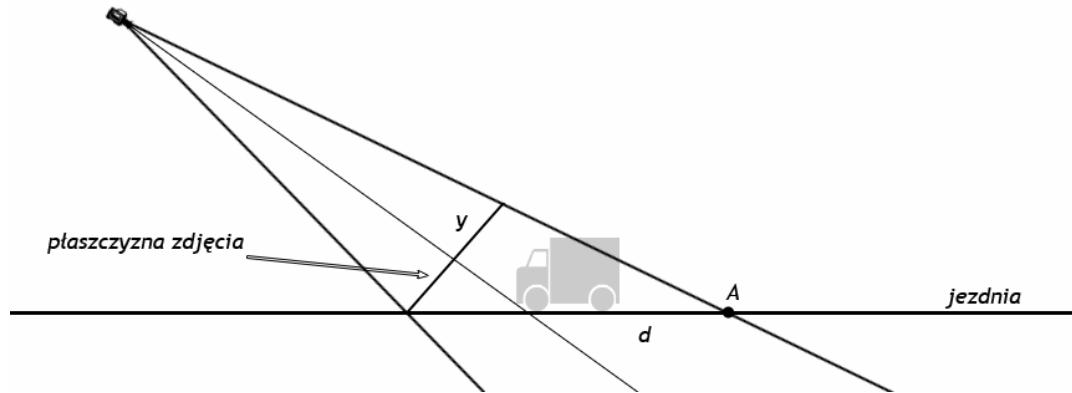
Jako że program w pierwszej fazie wykrywa obszary tablic rejestracyjnych, dlatego informacja o ich położeniu na ekranie jest już dostępna. Co więcej, ponieważ numery tych tablic są rozpoznawane, to nie trzeba wykorzystywać żadnych innych algorytmów do identyfikacji i śledzenia pojazdów na kolejnych obrazach – wystarczy porównywać numery rejestracyjne na kolejnych obrazach.

Kolejną zaletą tej metody jest niezmienna pozycja tablicy rejestracyjnej względem pojazdu. Nie ma tu znaczenia, czy część pojazdu będzie zasłonięta, czy pojazd będzie rzucać cień. Dlatego tablicę rejestracyjną można uznać za punkt referencyjny pojazdu i na tej podstawie określić pozycję tego pojazdu.

Etap 1. Wyznaczanie położenia pojazdu.

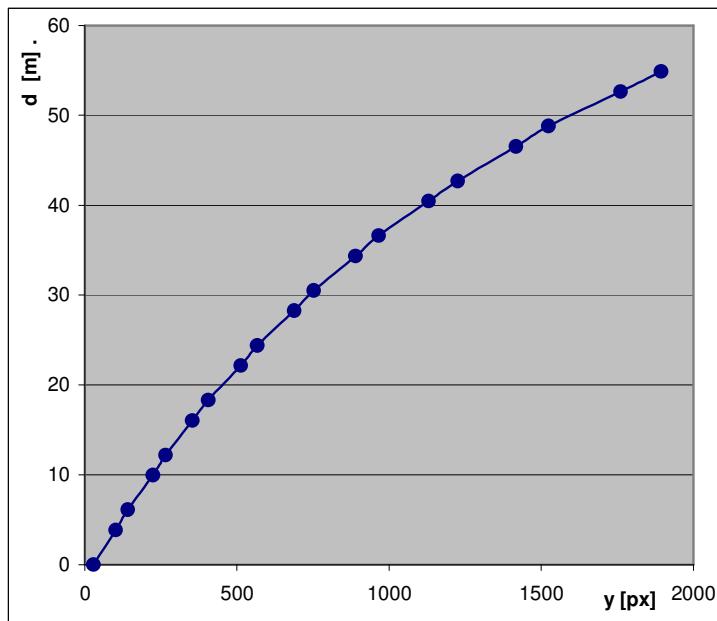
Na wstępie trzeba wyraźnie zaznaczyć, że wyznaczanie położenia obiektu w przestrzeni trójwymiarowej na podstawie obrazu dwuwymiarowego nie jest możliwe bez dodatkowych założeń. W programie założono, że pojazdy poruszają się w pewnych określonych płaszczyznach. W przypadku obserwacji pojazdów jadących po drodze, można założyć, że tą płaszczyzną będzie jezdnia. Położenie y obiektu na obrazie można zrzutować na tę płaszczyznę (Rysunek 80). Uzyskuje się wtedy odległość d obiektu względem pewnego punktu A na tej płaszczyźnie, wyznaczonego przez granicę widoczności. Rzutowanie to można ogólnie opisać wzorem $d=f(y)$, gdzie y jest współrzędną pionową położenia pojazdu (tablicy rejestracyjnej) na obrazie wyrażoną w

pikselach. Jest to funkcja nieliniowa. Można by próbować wyznaczyć ją analitycznie, jednak jezdnie rzadko bywają idealnie proste, a obiektyw aparatu często wprowadza dodatkowe zniekształcenia obrazu. Dlatego najbezpieczniej wyznaczyć tę funkcję doświadczalnie i tak to też zostało zrobione w stworzonym programie.



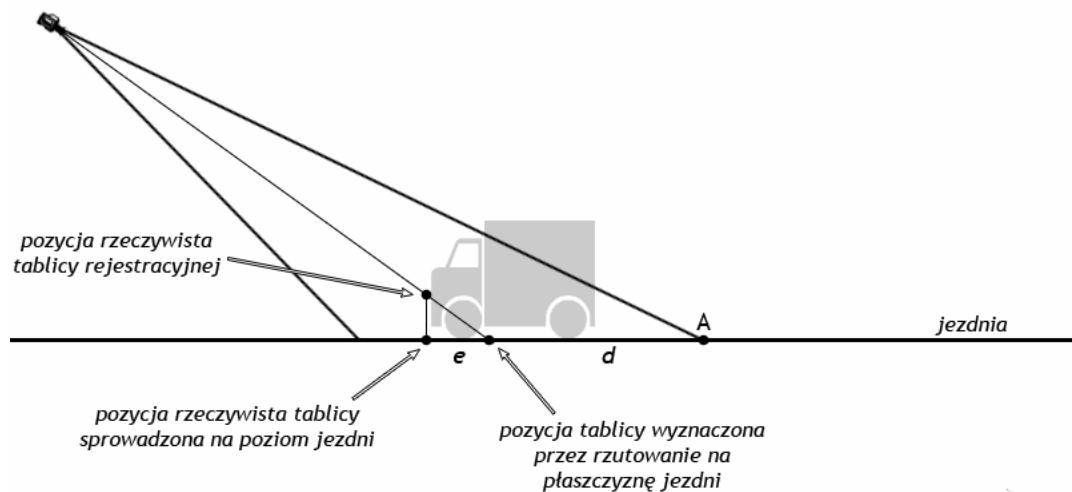
Rysunek 80. Zasada wyznaczania położenia obiektów na podstawie zdjęcia.

Przykład eksperymentalnie wyznaczonego odwzorowania $d=f(y)$ został przedstawiony jako wykres na rysunku 81. Jak widać, otrzymana krzywa jest regularna i można ją łatwo aproksymować funkcją wielomianową. W tym konkretnym przypadku otrzymano funkcję $d = -1,019 \cdot 10^{-10} y^4 + 7,658 \cdot 10^{-7} y^3 - 0,00258 y^2 + 5,824 y - 171,1$.



Rysunek 81. Przykład eksperymentalnie wyznaczonego odwzorowania $d=f(y)$.

Pojawia się jednak kolejny problem. Odwzorowanie $d=f(y)$ będzie prawdziwe tylko dla jednej płaszczyzny – płaszczyzny jezdni. Niestety, tablica znajduje się na pewnej wysokości w stosunku do jezdni, co powoduje, że płaszczyzna po której będzie się poruszać, nie będzie tą samą płaszczyzną co płaszczyzna jezdni. Wyznaczona odległość d będzie obarczona błędem e (Rysunek 82). Błąd ten można byłoby zniwelować określając odwzorowanie $d=f(y)$ dla płaszczyzny po której porusza się tablica rejestracyjna, gdyby nie fakt, że tablice rejestracyjne różnych pojazdów znajdują się na różnych wysokościach. Na dodatek przepisy nie określają ani minimalnej, ani maksymalnej wysokości przednich tablic rejestracyjnych (Rozdział 2.2.3).



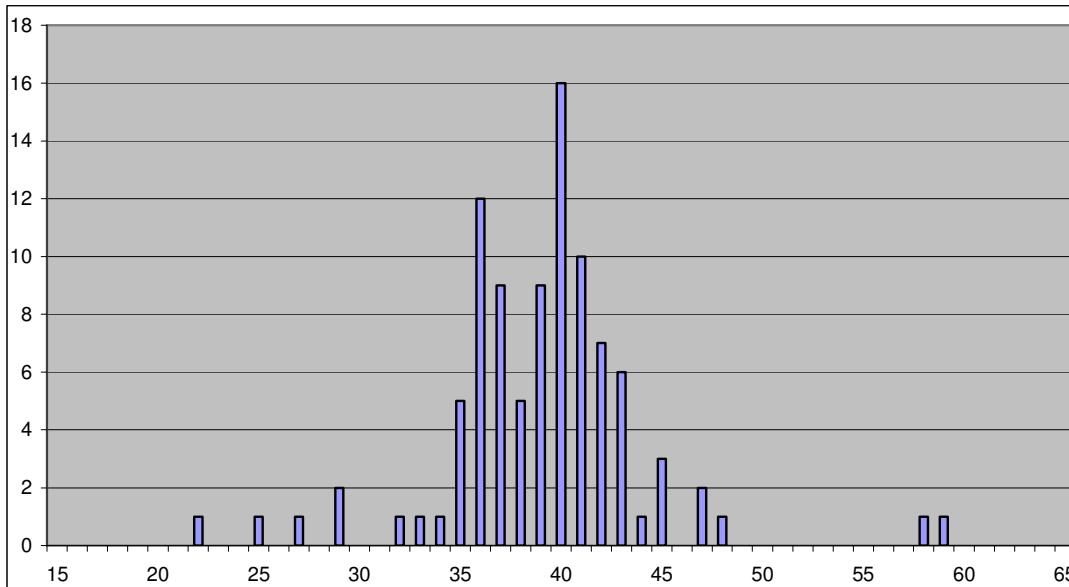
Rysunek 82. Ilustracja błędu powstającego przy rzutowaniu pozycji obiektów nieznajdujących się na poziomie jezdni.

Błąd e można jednak zminimalizować korzystając z faktu, że większość pojazdów posiada tablice zamocowane na zbliżonej wysokości. Korekcję można więc zrealizować na przykład poprzez wyznaczenie średniej wysokości tablicy rejestracyjnej nad poziomem jezdni, a następnie przesunięcie płaszczyzny rzutowania na tę wysokość. Dlatego też w niniejszej pracy zdecydowano się przeprowadzić odpowiednie badania w celu ustalenia statystyki wysokości tablic rejestracyjnych nad poziomem jezdni dla reprezentatywnej grupy pojazdów.

Do badań wybrano ulicę miasta o dużym natężeniu ruchu, będącą dodatkowo drogą krajową. Na drodze takiej oprócz samochodów osobowych pojawiają się dość często samochody ciężarowe, na których tablice rejestracyjne mogą być umieszczone znacznie wyżej niż na samochodach osobowych. Łącznie przebadano 100 pojazdów, a wyniki zebrano w Tabeli 7 umieszczonej w aneksie. Średnia wysokość wyniosła

41,63 cm, natomiast minimalna i maksymalna wysokość wyniosła odpowiednio 22 cm i 134 cm.

Wykres liczby tablic w zależności od wysokości nad poziomem jezdni (zaokrąglonej do 1 cm), przedstawiono na rysunku 83. Widać wyraźnie, że większość tablic umieszczonych jest na wysokości 35-45 cm.



Rysunek 83. Ilość tablic w zależności od wysokości nad poziomem jezdni, zaokrąglonej do 1 cm. Pominięto tablice położone wyżej niż 65 cm.

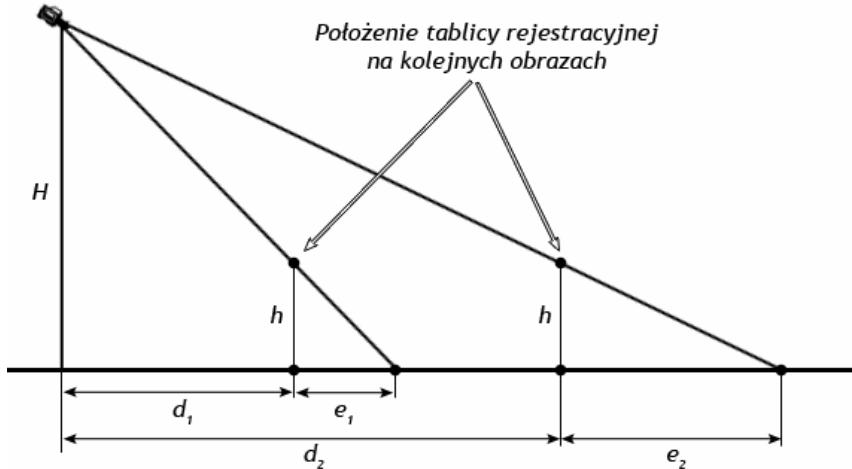
Warto zauważyć, że korekcja może adaptowana do konkretnych warunków drogowych. Na przykład, na małych ulicach miejskich, duże samochody ciężarowe będą pojawiać się znacznie rzadziej niż na głównych ulicach lub trasach tranzytowych, a co za tym idzie, średnie położenie tablicy rejestracyjnej będzie inne w przypadku ulicy osiedlowej, a inne w przypadku trasy tranzytowej.

Etap 2. Wyznaczanie prędkości pojazdu.

Prędkość pojazdu wyznaczana jest na podstawie różnicy położeń pojazdu (a właściwie położeń jego tablicy rejestracyjnej) na kolejnych obrazach. Ponieważ odstęp czasowy T między rejestracją kolejnych obrazów jest znany, a pozycje d_1 i d_2 są wyznaczone z funkcji $d=f(y)$, można w łatwy sposób obliczyć prędkość pojazdu v ze wzoru:

$$v = (d_1 - d_2) \cdot T$$

Trzeba jednak pamiętać, że wyznaczone pozycje d_1 i d_2 są obarczone błędami odpowiednio e_1 i e_2 , tak jak to wykazano wcześniej w tym rozdziale. Należy zbadać wpływ tego błędu na wynik ostatecznych obliczeń prędkości.



Rysunek 84. Ilustracja odległości (d_1 i d_2) i błędów (e_1 i e_2) podczas wyznaczania prędkości (różnicy odległości).

Można założyć, że wysokość kamery H jest stała. Również, wysokość tablicy rejestracyjnej nad jezdnią h nie zmienia się wraz z poruszaniem się pojazdu. Przykładową sytuację przedstawia schemat na rysunku 84. W momencie rejestrowania zdjęcia pierwszego, pojazd znajdował się w odległości d_1 , natomiast w momencie rejestrowania zdjęcia drugiego w odległości d_2 . Prędkość pojazdu jest proporcjonalna do przebytej drogi S , czyli do różnicy tych odległości. Rzeczywista przebyta droga jest równa:

$$S_R = d_2 - d_1 \quad (1)$$

Prędkość wyznaczona na podstawie rzutowania na płaszczyznę jedni jest obarczona błędem i wynosi:

$$S_W = (d_2 + e_2) - (d_1 + e_1) \quad (2)$$

Błąd bezwzględny Δ wyniesie:

$$\Delta = S_W - S_R = (d_2 + e_2) - (d_1 + e_1) - (d_2 - d_1) = e_2 - e_1 \quad (3)$$

Korzystając z twierdzenia Talesa można uzależnić wartość błędu e od wysokości H i h , oraz odległości d :

$$\frac{H}{d_1 + e_1} = \frac{h}{e_1} \quad (4)$$

Przekształcając (4) otrzymuje się:

$$H \cdot e_1 = h(d_1 + e_1)$$

$$e_1(H - h) = h \cdot d_1$$

Ostatecznie:

$$e_1 = \frac{h}{H - h} \cdot d_1$$

Oraz analogicznie:

$$e_2 = \frac{h}{H - h} \cdot d_2$$

Podstawiając do wzoru (3) i stosując (1), otrzymuje się:

$$\Delta = e_2 - e_1 = \frac{h}{H - h} \cdot (d_2 - d_1) = \frac{h}{H - h} \cdot S_R$$

Błąd względny jest równy:

$$\delta = \frac{\Delta}{S_R} = \frac{h}{H - h} \quad (5)$$

Jak widać, błąd względny wyznaczania prędkości jest stały i zakładając że wysokość umieszczenia kamery H nie zmienia się, błąd ten zależy tylko i wyłącznie od wysokości tablicy rejestracyjnej nad poziomem jezdni. Dla przykładu, gdy kamera znajduje się na wysokości 10 metrów, a tablica rejestracyjna na wysokości 40 cm, powyższy błąd względny wyniesie 4,2%. Jednak podniesienie powierzchni rzutowania do poziomu 40 cm, spowoduje, że większość tablic znajdzie się na wysokości ± 10 cm w stosunku do tej płaszczyzny, a wtedy błąd względny dla tych pojazdów będzie się wałał w granicach $\pm 1\%$, co jest już wartością zadowalającą.

Warto zauważyć, że błąd wyznaczania prędkości zmniejsza się wraz ze zwiększeniem wysokości umieszczenia kamery H . Wydawać by się mogło, że należy dążyć do jak najwyższego umieszczenia kamery. Niestety napotyka się tu na dość poważne ograniczenia. Wyżej umieszczona kamera wymaga użycia większego powiększenia, lub większego pochylenia kamery, aby pojazdy na zdjęciach pozostały tej samej wielkości. Niestety stosowanie dużych powiększeń jest niewskazane głównie ze względu na zwiększenie wrażliwości aparatu na drgania wywołane między innymi przez przejeżdżające pojazdy. Z kolei zwiększenie kąta nachylenia kamery nie jest dobrym rozwiązaniem z powodu ograniczenia rejestrowanego obszaru drogi (Rozdział 3.4). Dlatego też wybór wysokości umieszczenia kamery musi być przeprowadzony empirycznie.

5. Wyniki badań

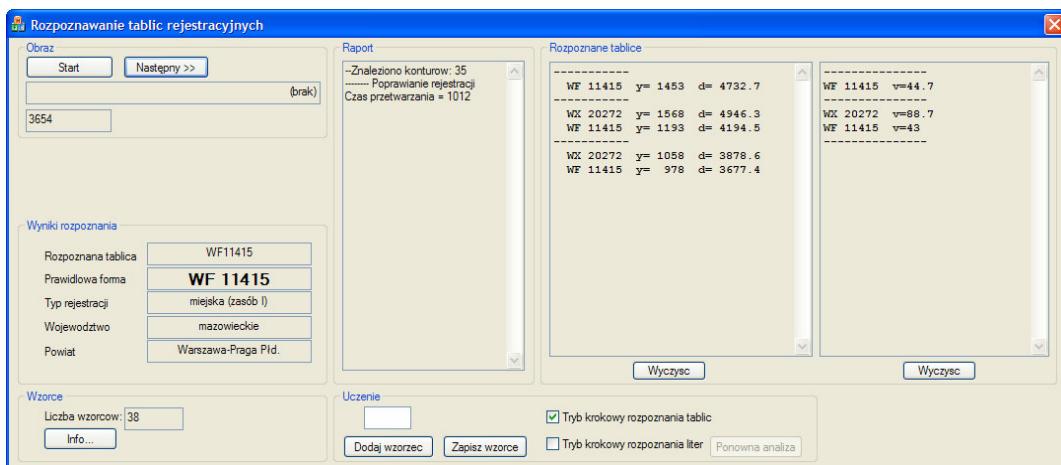
Testy aplikacji zostały prowadzone na komputerze typu „notebook” z procesorem Pentium-M 1.8GHz. Komputer wyposażony był w 1GB pamięci RAM. Do rejestrowania zdjęć użyto aparatu Canon PowerShot S3 IS, którego parametry opisane są w rozdziale 3.2. Zdjęcia rejestrowane były w najwyższej oferowanej rozdzielczości – 2816 x 2112 pikseli (6Mpx), w formacie JPEG w najlepszej oferowanej przez aparat jakości (najmniejsza kompresja).

5.1.1. Dokładność rozpoznawania tablic

Do celów testowych zarejestrowano dwie sekwencje po około 700 zdjęć każda. Warunki atmosferyczne w obu przypadkach były dobre: przejrzystość powietrza wysoka, zachmurzenie całkowite, brak opadów. Pomimo całkowitego zachmurzenia, oświetlenie naturalne było wystarczające i nie zanotowano rozmyć nawet na szybko jadących pojazdach. Jednak z uwagi na porę jesienną, na sekwencji nr 2 wiele samochodów miało mocno zabrudzone tablice, co odbiło się na wynikach badań.



Rysunek 85. Przykładowe trzy kolejne klatki sekwencji nr 1.



Rysunek 86. Okno programu po analizie trzech przykładowych obrazów z rysunku 85.

Na sekwencji nr 1 pojawiło się łącznie 85 pojazdów, a na sekwencji nr 2 – 165 pojazdów. Wyniki rozpoznawania zostały umieszczone odpowiednio w tabeli 2 i tabeli 3. Nie obejmują one starych tablic rejestracyjnych, ponieważ stare tablice nie są obsługiwane w obecnej wersji programu.

Wyniki zostały pogrupowane na dwie kategorie:

- numery tablic zwrocone przez program – czyli takie które program zakwalifikował jako rozpoznane prawidłowo.
- tablice nierożpoznane oraz pominięte – czyli takie których program nie był w stanie rozpoznać, oraz takie, które zostały rozpoznane, ale odrzucone na podstawie nieprawidłowej składni.

Tabela 2. Wyniki rozpoznawania, sekwencja nr 1.

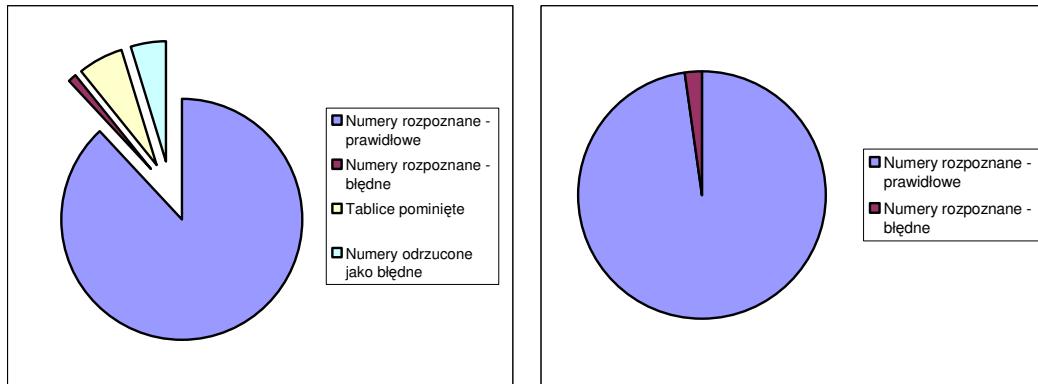
	Liczba	Procent
Razem wszystkich tablic	85	100,0%
Numery tablic zwrocone przez program:		
- poprawne	74	88,1%
- błędne	1	1,2%
Tablice nierożpoznane oraz odrzucone:		
- tablice odrzucone jako błędne	4	4,8%
- inne przyczyny	6	6,0%

Tabela 3. Wyniki rozpoznawania, sekwencja nr 2.

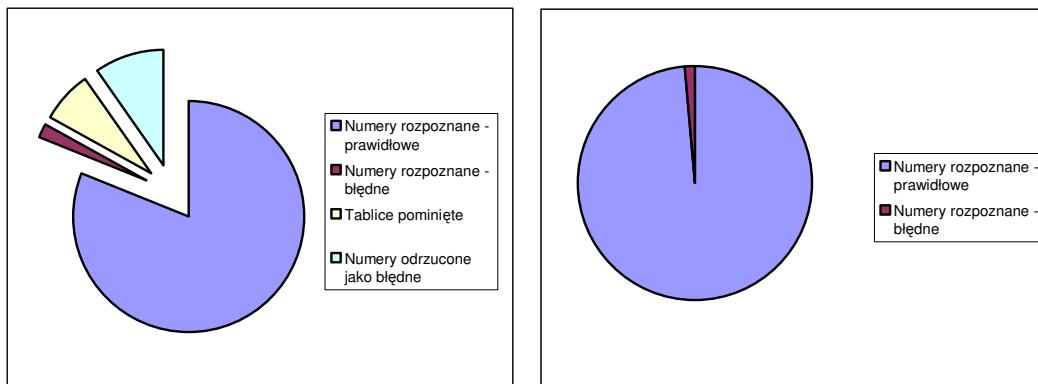
	Liczba	Procent
Razem wszystkich tablic	165	100,0%
Numery tablic zwrocone przez program:		
- poprawne	134	81,2%
- błędne	3	1,8%
Tablice nierożpoznane oraz odrzucone:		
- tablice odrzucone jako błędne	16	9,7%
- inne przyczyny	12	7,3%

Wyniki zostały również przedstawione w formie wykresów na rysunkach 87 oraz 88. Dodatkowo w prawej części obu rysunków przedstawiono udział błędnie

rozpoznanych tablic wśród numerów określonych przez program jako prawidłowe. Błędy takie nazwano błędami krytycznymi, ponieważ mogą mieć bardzo poważne skutki, np. przypisane wykroczenia niewłaściwemu pojazdowi. Błędy te wyniosły 1,8% w przypadku sekwencji nr 1 oraz 2,2% w przypadku sekwencji nr 2.



Rysunek 87. Wyniki rozpoznawania tablic dla pierwszej sekwencji. (a) Rozkład względem wszystkich tablic; (b) Rozkład względem numerów zwróconych przez program.



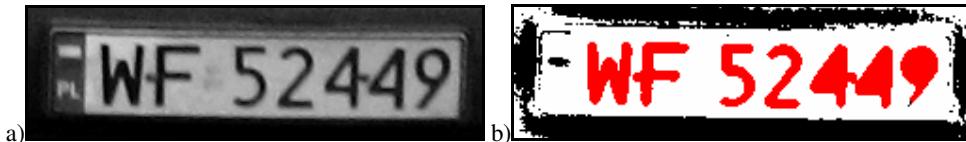
Rysunek 88. Wyniki rozpoznawania tablic dla drugiej sekwencji. (a) Rozkład względem wszystkich tablic; (b) Rozkład względem numerów zwróconych przez program.

Warto zauważyć, że program nie zwrócił żadnych wyników rozpoznawania nieistniejących tablic. Pomimo że takie fałszywe rozpoznania zdarzały się na poziomie analizy pojedynczych obrazów (najczęściej napisy na pojazdach oraz elementy karoserii), to analiza sekwencji oraz analiza składniowa pozwalały za każdym razem odrzucić takie fałszywe rozpoznania.

5.1.2. Analiza błędów rozpoznawania tablic rejestracyjnych

Większość błędów było spowodowanych specyfiką zastosowanej metody lokalizacji i segmentacji znaków. Metoda ta bazuje na segmentacji obrazu przy użyciu metod elementów połączonych i wymaga, aby litery tablicy rejestracyjnej były wyraźnie oddzielone od innych liter oraz pozostałych elementów mogących pojawić się w obszarze tablicy rejestracyjnej. Niestety, na przykład stosowane przez wielu kierowców śruby do mocowania tablicy, wkręcane bezpośrednio w tablicę często w bezpośrednim sąsiedztwie znaków, mogą spowodować, że sąsiadujące ze sobą znaki zostaną sztucznie połączone i zinterpretowane przez program jako jeden obszar.

Na rysunku 89a przedstawiona jest sytuacja, w której jedna śruba styka się z literą F a druga z cyfrą 4. Na rysunku 89b kolorem czerwonym zaznaczono elementy zakwalifikowane jako znaki tablicy rejestracyjnej. Jak widać, wszystkie znaki zostały wydzielone poprawnie. Pomimo tego, rozpoznawanie cyfry 4 zakończyło się błędem – została rozpoznana jako cyfra 6. Litera F została rozpoznana poprawnie. W rezultacie otrzymano numer WF 52649, różnicy się jedną cyfrą od prawidłowego. Jest to poważny problem, ponieważ program nie jest w stanie określić, czy rozpoznana tablica jest błędna.



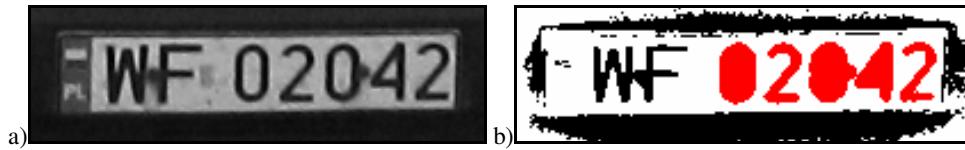
Rysunek 89. Przykład tablicy ze śrubą zakłócającą rozpoznanie znaków. (a) Obraz oryginalny; (b) Rozpoznanie znaków.

Rysunek 90 przedstawia sytuację, kiedy to śruba łączy dwa znaki tablicy rejestracyjnej. Jak widać na obrazie binarnym (Rysunek 90b), znaki są połączone, a zatem zostaną zinterpretowane jako jeden obszar i odrzucone ze względu na zbyt duże dysproporcje wymiarów w stosunku do pozostałych obszarów. W takim przypadku tablica nie zostanie w ogóle rozpoznana.

Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być wykorzystanie operacji otwarcia, która spowodowałaby usunięcie połączenia i rozdzielenie liter. Niestety rozmiar zakłócenia może być dość duży, i zastosowanie odpowiednio dużego rozmiaru operacji otwarcia może spowodować „rozłączenie” pojedynczego znaku na kilka elementów.

Innym sposobem może być wykrywanie takich połączonych elementów a następnie ich rozdzieranie. Wykrywanie mogłoby być możliwe choćby ze względu na podobieństwo wysokości, oraz położenie w tej samej linii, co sąsiadujące znaki. Jeżeli

dodatkowo taki podejrzany obszar byłby dwukrotnie większy niż spodziewana szerokość prawidłowego znaku, to można podejrzewać, że są to dwa znaki, a wtedy można próbować je rozdzielić, na przykład stosując podział pół na pół.



Rysunek 90. Przykład tablicy ze śrubą łączącą dwa znaki tablicy: (a) Obraz oryginalny; (b) Rozpoznane znaki.

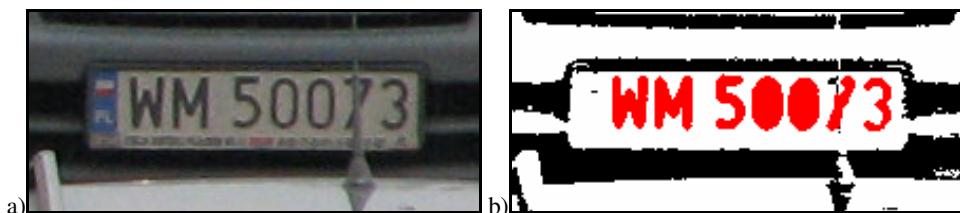
Zdarzają się również sytuacje, że tablica jest umieszczona w ramce w taki sposób, że znaki łączą się z tą ramką, co również powoduje niemożliwość segmentacji tych znaków przy wykorzystaniu metod elementów połączonych. Na rysunku 91 przedstawiona jest podobna sytuacja. Śruba łączy literę T z ramką tablicy rejestracyjnej. W takim przypadku litera w ogóle nie jest kwalifikowana jako znak tablicy rejestracyjnej (Rysunek 91b).

Problem ten można próbować rozwiązać poprzez wyznaczenie prostokąta otaczającego wydzielone poprawnie znaki, a następnie ponowną segmentację. Po wycięciu zostanie obszar samych liter, a ramka tablicy zostanie usunięta. Dzięki temu zniknie połączenie litery T z ramką, a zatem wykonanie ponownej segmentacji powinno dać w rezultacie poprawną segmentację wszystkich znaków.



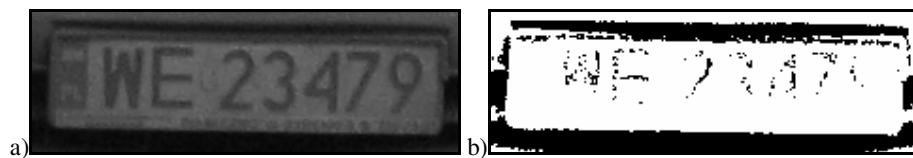
Rysunek 91. Ilustracja połączenia znaku z ramką tablicy rejestracyjnej. (a) Obraz oryginalny; (b) Rozpoznane znaki.

Na rysunku 92 przedstawiona jest sytuacja, w której tablica rejestracyjna jest częściowo przesłonięta przez antenę znajdująca się na dachu innego pojazdu. Jak widać, na obrazie binarnym cyfra 7 została zniekształcona a przez to jej rozpoznanie może być błędne.



Rysunek 92. Ilustracja częściowego przesłonięcia tablicy rejestracyjnej przez antennę innego pojazdu. (a) Obraz oryginalny; (b) Rozpoznane znaki

Błędy lokalizacji i segmentacji pojawiają się również w przypadku niskiego kontrastu obrazu tablic, kiedy to algorytmy adaptacyjnego progowania nie są w stanie zapewnić wystarczającego odseparowania liter od tła, lub też powodują rozdzielenie jednej litery na kilka elementów. W przypadkach ekstremalnych znaki tablicy po progowaniu pozostają praktycznie niewidoczne (Rysunek 93). Rozpoznanie tablicy w takich przypadkach jest niemożliwe w obecnej wersji programu.

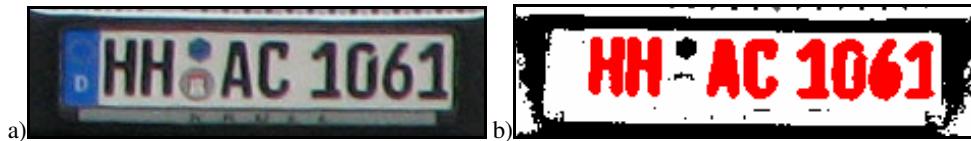


Rysunek 93. Przykład obrazu tablicy o niskim kontraście:
(a) Obraz oryginalny; (b) Rozpoznane znaki.

Kolejnym źródłem błędów był algorytm rozpoznawania znaków. W opracowanym programie liczba błędnie rozpoznanych znaków została ograniczona poprzez zastosowanie wyszukiwania identycznych tablic na kolejnych obrazach. Wyszukiwanie te było zastosowane przede wszystkim do wyznaczania prędkości, jednak okazało się, że stanowi również znakomitą metodę weryfikacji poprawności rozpoznawania znaków. Tablica jest akceptowana dopiero wtedy, gdy ten sam numer zostanie rozpoznany na dwóch kolejnych obrazach. Dodatkowo liczba błędów została ograniczona poprzez analizę składniową tablic.

Podobny problem stanowiły zagraniczne tablice rejestracyjne. Wiążą się z tym dwie kwestie. Po pierwsze, król znaków w każdym kraju jest nieco inny, dlatego też zastosowana w programie metoda analizy cech gęstościowych może błędnie rozpoznawać takie znaki. Po drugie, ze względu na inną składnię zagranicznych numerów rejestracyjnych, korekcja numeru na podstawie analizy składniowej może spowodować powstanie błędów, nawet jeśli w pierwszej fazie rozpoznania numer rejestracyjny został rozpoznany poprawnie.

Przykład takiej tablicy przedstawiony jest na rysunku 94. Rozpoznanego został numer MMA C1061. Różnica w kroju czcionki spowodowała, że litera H została rozpoznana jako M. Pozostałe znaki zostały rozpoznane prawidłowo. Tablica taka zostanie jednak odrzucona, ze względu na to, że w Polsce nie ma tablic rozpoczęjących się od kombinacji MMA.



Rysunek 94. Niemiecka tablica rejestracyjna. (a) Obraz oryginalny; (b) Rozpoznane znaki.

Pewnym rozwiązańiem problemu obcych tablic rejestracyjnych mogłoby być dodanie wzorców liter stosowanych w innych krajach. Nie jest to jednak rozwiązanie optymalne ze względu na wydłużenie czasu analizy oraz trudności w zdefiniowaniu wszystkich znaków stosowanych we wszystkich krajach. Optymalnym rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie metody analizy cech topologicznych, ponieważ kroje czcionek stosowanych w większości krajów są pod tym względem bardzo podobne.

5.1.3. Dokładność wyznaczania prędkości

Do celów testowych zarejestrowano 3 sekwencje, na których widoczny jest pojazd testowy poruszający się ze znaną stałą prędkością. Prędkość pojazdu testowego określana była przy użyciu urządzenia GPS. Ze względu na to, że prędkość wyświetlna była bez części dziesiętnych, dokładność odczytu szacowana jest na ± 1 km/h. Na kolejnych sekwencjach pojazd poruszał się z prędkościami 43 km/h, 58 km/h oraz 71 km/h.

Aparat został ustawiony na wysokości $H = 750$ cm, natomiast tablica rejestracyjna w badanym pojeździe znajdowała się na wysokości $h = 40$ cm względem jezdni. W programie zastosowano korekcję do wysokości 40 cm, o której mowa w rozdziale 4.5.8. Zatem tablica rejestracyjna znajdowała się na skorygowanym poziomie jezdni, więc zgodnie ze wzorem (5) z rozdziału 4.5.8, prędkość pojazdu wyznaczona przez program powinna być równa rzeczywistej. Wyniki wraz z obliczonymi błędami bezwzględnymi Δ i względnymi δ zostały przedstawione w tabeli 4.

Jak widać, błędy względne zawierały się w granicach od -2,7% do 3,5%. Wszystko to przy założeniu, że znana jest wysokość danej tablicy rejestracyjnej nad jezdnią. W przypadku gdy wysokość ta nie jest znana, można użyć korekcji, a wtedy w przypadku 95% pojazdów błąd wzrośnie o maksymalnie 1,5%, co daje całkowity błąd równy $\pm 5\%$. Dla porównania, w przypadku radarowego miernika prędkości, przy prędkościach mniejszych niż 100 km/h, błąd wynosi ± 3 km/h [6], a więc przy prędkości 50 km/h będzie to $\pm 6\%$. Wynika z tego, że opracowana w programie metoda

wyznaczania prędkości jest w niektórych przypadkach dokładniejsza od mierników radarowych.

Niestety w przypadku ok 1% pojazdów całkowity błąd może wynieść nawet 12%. Ze względu na istnienie takich przypadków, programu nie można użyć jako miernika prędkości, a raczej trzeba go traktować jako wskaźnik przybliżonej prędkości. Korekcja tego błędu możliwa byłaby po wyznaczeniu, nawet przybliżonym, wysokości tablicy nad jezdnią. Jest to jednak problem o znacznym stopniu skomplikowania, dlatego zrezygnowano z jego opracowywania.

Tabela 4. Wyniki wyznaczania prędkości przez stworzony program.

	Sekwencja 1			Sekwencja 2			Sekwencja 3		
	v ¹⁾	Δ ¹⁾	δ ¹⁾	v	Δ	δ	v	Δ	δ
Prędkość rzeczywista ²⁾	43			55			71		
Prędkości wyznaczone przez program	43,3	0,3	0,7%	54,9	-0,1	-0,2%	70,7	-0,3	-0,4%
	44,0	1,0	2,3%	56,0	1,0	1,8%	71,1	0,4	0,6%
	42,9	-0,1	-0,2%	55,9	0,9	1,6%	71,0	-0,1	-0,1%
	44,1	1,1	2,6%	56,2	1,2	2,2%	69,1	-1,9	-2,7%
	42,6	-0,4	-0,9%	56,9	1,9	3,5%			
	44,0	1,0	2,3%						

1) v – prędkość; Δ – błąd bezwzględny, δ – błąd względny

2) Prędkość rzeczywista ustalona przy użyciu urządzenia GPS.

5.1.4. Szybkość przetwarzania obrazów

Jedną z bardziej istotnych kwestii podczas tworzenia systemu była szybkość przetwarzania sekwencji obrazów. Ponieważ system powinien działać w czasie rzeczywistym, obrazy pochodzące z kamery powinny być rozpoznawane na bieżąco. Dzięki optymalizacji algorytmów na testowym komputerze udało się uzyskać czas rozpoznawania jednego obrazu o rozdzielczości 2816 x 2112 równy 1 sekundę. W rzeczywistości jednak samo rozpoznawanie obrazu trwa ok 400 ms, pozostały czas, to czas wczytania zdjęcia z dysku twardego do pamięci RAM. Jednak dyski komputerów

klasy „notebook” nie są zbyt wydajne, więc być może tutaj leżała problem wolnego odczytu danych.

W przypadku aparatu Canon, interwał czasowy pomiędzy kolejnymi zdjęciami wynosi ok 430 ms. Wydaje się więc, że zastosowanie nowoczesnego komputera klasy PC, oraz optymalizacja transmisji obrazów do pamięci RAM, pozwoliłyby razem na przetwarzanie sekwencji zdjęć w czasie rzeczywistym.

6. Podsumowanie i wnioski

Celem pracy było zbudowanie systemu automatycznego rozpoznawania tablic rejestracyjnych wraz z analizą parametrów ruchu. W stosunku do systemów obecnych na rynku, opracowany system miał wnosić nową funkcjonalność – możliwość dynamicznego rozpoznawania numerów rejestracyjnych pojazdów wraz z wyznaczaniem prędkości tych pojazdów. Na podstawie wyników testów można stwierdzić, że udało się uzyskać całkiem dobre rezultaty.

W stosunku do innych rozwiązań, stworzony system posiada szereg zalet. Przede wszystkich istnieje możliwość rozpoznawania pojazdów w regularnym ruchu drogowym, nawet na wielopasmowych drogach. Dodatkowo program wyznacza przybliżoną prędkość poruszania się każdego pojazdu z osobna. Program był w stanie rozpoznać i wyznaczyć prędkość nawet 4 pojazdów jednocześnie.

Dokładność rozpoznawania tablic, jest mniejsza niż innych systemów tego typu. Wynika to głównie z niedoskonałości zastosowanych algorytmów. Jednak dopracowanie wszystkich szczegółów przez jedną osobę, ze względu na obszerność tematu, nie było możliwe w rozsądny czasie. Do dużej ilości błędów przyczyniły się nienajlepsze warunki pogodowe podczas testów (wiele tablic było zabrudzonych). Poprawę wyników można by uzyskać przede wszystkim poprzez ulepszenie algorytmów, zarówno lokalizacji, jak i rozpoznawania znaków.

Program potrafi wyznaczać prędkość pojazdów, jednak funkcja ta posiada kilka ograniczeń i wad. Z jednej strony można uzyskać wyniki dokładniejsze niż w przypadku radarowych mierników prędkości. Z drugiej strony mogą się pojawić pojazdy, które będą posiadały wysoko zamocowaną tablicę rejestracyjną, co spowoduje wystąpienie znacznego błędu. Aby skorygować ten błąd należałyby opracować metody wyznaczania wysokości tablicy nad jezdnią, np w zależności od rozmiaru pojazdu. W chwili obecnej program może być jednak pomocny przy wyłapywaniu kierowców znacznie przekraczających dozwoloną prędkość.

Szybkość działania programu można określić jako dużą. Chociaż rozpoznawanie pojedynczego obrazu trwa nawet 1 sekundę, to jednak trzeba wiedzieć, że program operuje na zdjęciach o rozmiarze ok. 6 milionów pikseli (2816 x 2112). W innych systemach tego typu analizowane zdjęcia są dużo mniejsze, najczęściej 0,3-1 milionów pikseli. Przystosowanie systemu do działania w czasie rzeczywistym wymaga użycia szybszego komputera. Dodatkowo należałyby opracować metodę połączenia aparatu

cyfrowego z komputerem, lub użyć specjalistycznej kamery przystosowanej do takich celów.

Podobnie jak w innych rozwiązaniach, jednym z głównych problemem jest niemożliwość uzyskania dużej dokładności rozpoznawania. Istnieje cały szereg problemów, często takich, których nie da się zlikwidować ani nawet zminimalizować, jak na przykład niska przejrzystość powietrza lub wysokie zabrudzenie tablicy.

Dlatego przyszłość automatycznego rozpoznawania pojazdów leży nie w udoskonalaniu systemów ARTR, ale w wyposażaniu każdego pojazdu w unikalny zdalny identyfikator elektroniczny. W niektórych krajach takie systemy już funkcjonują. Błędne rozpoznanie pojazdu w przypadku elektronicznego identyfikatora jest właściwie niemożliwe, a zarazem identyfikacja jest pewna w każdych warunkach pogodowych i oświetleniowych, jednak koszt wdrożenia takiego systemu jest nieporównywalnie większy.

Bibliografia

- [1] Adaptive Recognition, CARMEN® Systems, <http://www.platerecognition.info/>
- [2] Amano, H.: *Intelligent Transport Systems for Sustainable Mobility*, Intelligent Vehicles Symposium 2006, Tokyo, 2006, s. 430.
- [3] Barroso, J.; Dagless, E.L.; Rafael, A.; Bulas-Cruz, J., *Number plate reading using computer vision*, Proceedings of the IEEE International Symposium, Industrial Electronics, 1997, ISIE '97. s. 761-766.
- [4] Castello, P.; Coelho, C.; Del Ninno, E.; Ottaviani, E.; Zanini, M.: *Traffic Monitoring in Motorways by Real-Time Number Plate Recognition*, Image Analysis and Processing, Proceedings. International Conference, 1999, s. 1128-1131
- [5] Chang S.L.; Chen L.S.; Chung Y.C.; Chen S.W.: *Automatic License Plate Recognition*, IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 5, No. 1, 2004, s. 42-53.
- [6] CNPEP RADWAR, Radarowy miernik prędkości Rapid-2Ka, <http://www.radwar.com.pl/pol/2kaz.htm>
- [7] Czajewski, W.; Staniak, M.: *Biblioteka do akwizycji i rozpoznawania obrazów*, Warszawa: Centrum Automatyki i Technik Informacyjno-Decyzyjnych, 2003.
- [8] Czajewski, W.; Żuraw, J.: *Zastosowanie teorii zbiorów przybliżonych do rozpoznawania znaków*, Warszawa: Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, 1997.
- [9] DARPA Grand Challenge 2005, <http://www.grandchallenge.org/>
- [10] Elte Centrum, Systemy Zarządzania Ruchem, <http://www.elte.f.pl/?id=pr1>
- [11] *Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.2*, Japonia, Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA), 2002, s. 30-31
- [12] Gendy, S.; Smith, C.L.; Lachowicz, S.: *Automatic car registration plate recognition using fast Hough transform*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers 31st Annual 1997 International Carnahan Conference, Australia, 1997, s. 209-218.
- [13] Główny Urząd Statystyczny, *Transport – Wyniki działalności w 2005r*, Departament Statystyki Usług GUS, Warszawa, 2006.

- [14] Iwanowski, M.: *Automatic car number plate detection using morphological image processing*, Warszawa: Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, 2005.
- [15] Kong, J.; Liu, X.; Lu, Y.; Zhou, Y.: *A Novel License Plate Localization Method Based On Textural Feature Analysis*, IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 2005.
- [16] Metisoft, Automatyczne Rozpoznawanie Tablic Rejestraacyjnych,
<http://www.mesoft.pl/pl/artr.html>
- [17] Naito, T.; Tsukada, T.; Yamada, K.; Kozuka, K.; Yamamoto, S.: *Robust license plate recognition method for passing vehicles under outside environment*, Vehicular Technology, IEEE Transactions on Vol. 49, 2000, s. 2309-2319
- [18] Otsu, N.: *A Threshold Selection Method From Gray Level Histogram*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-9, 1979, s. 62-66
- [19] Polskie Tablice Rejestraacyjne, <http://rejestracje.uctb.pl/>
- [20] Poon, J.C.H.; Ghadiali, M.; Mao, G.M.T.; Sheung, L.M.: *A robust vision system for vehicle licence plate recognition using grey-scale morphology*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '95, Volume 1, 1995, s. 394-399
- [21] Rahman, C.A.; Badawy, W.; Radmanesh, A.: *A real time vehicle's license plate recognition system*, IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS'03), Miami, 2003, s. 163-166.
- [22] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej, z dnia 1 kwietnia 1999 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia*. Dz. U. Nr 44, poz.432. z dnia 15 maja 1999 r.
- [23] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z w sprawie rejestracji i oznaczania pojazdów*, Dz. U. Nr 133, poz. 1123, z dnia 22 lipca 2002 r.
- [24] Shapiro, V.; Gluhchev, G.: *Multinational license plate recognition system: segmentation and classification*, Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'04) Vol. 4, Cambridge, 2004, s. 352-355.
- [25] Shaw, J.: *John Shaw's Landscape Photography*, New York: AMPHOTO, 1994, tłumaczenie: Małażewski, S.: <http://akson.sgh.waw.pl/~smalaz/ksiazka/spis.html>
- [26] Śląski klaster inteligentny system zarządzania transportem publicznym,
<http://www.transport.silesia.pl/default.aspx?docId=476&newsId=5&templId=2>

- [27] SoftArt, Rozpoznawanie tablic rejestracyjnych pojazdów,
http://www.softart.com.pl/oferta_lpr.html
- [28] Srebro, A.; Śladowski, M.: *Projekt i realizacja autonomicznego systemu wizyjnego dla robota mobilnego*, Warszawa: Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, 2006.
- [29] SwisTrack, <http://swis.epfl.ch/research/swistrack/>
- [30] Toll Collect, Toll Collect GmbH, 2006, <http://www.toll-collect.de>

ANEKS

Tabela 5. Wyniki pomiaru czasu akwizycji z użyciem na stopera.

L.p.	Czas	Interwał	Różnica ¹⁾	Różnica ¹⁾
0	236	-	-	-
1	666	430,0000	-2,22	-0,51%
2	1087	421,0000	-11,22	-2,60%
3	1518	431,0000	-1,22	-0,28%
4	1948	430,0000	-2,22	-0,51%
5	2379	431,0000	-1,22	-0,28%
6	2809	430,0000	-2,22	-0,51%
7	3250	441,0000	8,78	2,03%
8	3681	431,0000	-1,22	-0,28%
9	4111	430,0000	-2,22	-0,51%
10	4542	431,0000	-1,22	-0,28%
11	4983	441,0000	8,78	2,03%
12	5413	430,0000	-2,22	-0,51%
13	5844	431,0000	-1,22	-0,28%
14	6274	430,0000	-2,22	-0,51%
15	6715	441,0000	8,78	2,03%
16	7146	431,0000	-1,22	-0,28%
17	7576	430,0000	-2,22	-0,51%
18	7997	421,0000	-11,22	-2,60%
19	8427	430,0000	-2,22	-0,51%
20	8878	451,0000	18,78	4,35%
21	9309	431,0000	-1,22	-0,28%
22	9719	410,0000	-22,22	-5,14%
23	10160	441,0000	8,78	2,03%
24	10591	431,0000	-1,22	-0,28%
25	11021	430,0000	-2,22	-0,51%
26	11452	431,0000	-1,22	-0,28%
27	11892	440,0000	7,78	1,80%
28	12323	431,0000	-1,22	-0,28%
29	12754	431,0000	-1,22	-0,28%
30	13184	430,0000	-2,22	-0,51%
31	13625	441,0000	8,78	2,03%
32	14056	431,0000	-1,22	-0,28%
33	14486	430,0000	-2,22	-0,51%
34	14917	431,0000	-1,22	-0,28%
35	15357	440,0000	7,78	1,80%
36	15788	431,0000	-1,22	-0,28%
37	16219	431,0000	-1,22	-0,28%
38	16649	430,0000	-2,22	-0,51%
39	17080	431,0000	-1,22	-0,28%
40	17501	421,0000	-11,22	-2,60%
41	17931	430,0000	-2,22	-0,51%
42	18382	451,0000	18,78	4,35%
43	18812	430,0000	-2,22	-0,51%
44	19233	421,0000	-11,22	-2,60%
45	19664	431,0000	-1,22	-0,28%
46	20094	430,0000	-2,22	-0,51%
47	20545	451,0000	18,78	4,35%
48	20975	430,0000	-2,22	-0,51%

49	21416	441,0000	8,78	2,03%
50	21847	431,0000	-1,22	-0,28%
51	22267	420,0000	-12,22	-2,83%
52	22708	441,0000	8,78	2,03%
53	23149	441,0000	8,78	2,03%
54	23559	410,0000	-22,22	-5,14%
55	23990	431,0000	-1,22	-0,28%
56	24430	440,0000	7,78	1,80%
57	24881	451,0000	18,78	4,35%
58	25312	431,0000	-1,22	-0,28%
59	25742	430,0000	-2,22	-0,51%
60	26173	431,0000	-1,22	-0,28%
61	26594	421,0000	-11,22	-2,60%
62	27044	450,0000	17,78	4,11%
63	27475	431,0000	-1,22	-0,28%
64	27905	430,0000	-2,22	-0,51%
65	28336	431,0000	-1,22	-0,28%
66	28777	441,0000	8,78	2,03%
67	29207	430,0000	-2,22	-0,51%
68	29638	431,0000	-1,22	-0,28%
69	30069	431,0000	-1,22	-0,28%
70	30509	440,0000	7,78	1,80%
71	30940	431,0000	-1,22	-0,28%
72	31370	430,0000	-2,22	-0,51%
73	31801	431,0000	-1,22	-0,28%
74	32242	441,0000	8,78	2,03%
75	32672	430,0000	-2,22	-0,51%
76	33103	431,0000	-1,22	-0,28%
77	33534	431,0000	-1,22	-0,28%
78	33954	420,0000	-12,22	-2,83%
79	34385	431,0000	-1,22	-0,28%
80	34815	430,0000	-2,22	-0,51%
81	35246	431,0000	-1,22	-0,28%
82	35687	441,0000	8,78	2,03%
83	36117	430,0000	-2,22	-0,51%
84	36548	431,0000	-1,22	-0,28%
85	36979	431,0000	-1,22	-0,28%
86	37419	440,0000	7,78	1,80%
87	37850	431,0000	-1,22	-0,28%
88	38280	430,0000	-2,22	-0,51%
89	38711	431,0000	-1,22	-0,28%
90	39142	431,0000	-1,22	-0,28%
91	39572	430,0000	-2,22	-0,51%
92	40013	441,0000	8,78	2,03%
93	40443	430,0000	-2,22	-0,51%
94	40864	421,0000	-11,22	-2,60%
95	41295	431,0000	-1,22	-0,28%
96	41725	430,0000	-2,22	-0,51%
97	42156	431,0000	-1,22	-0,28%
98	42597	441,0000	8,78	2,03%
99	43027	430,0000	-2,22	-0,51%
100	43458	431,0000	-1,22	-0,28%

¹⁾ Różnica w stosunku do wartości średniej.

Tabela 6. Wyniki pomiaru czasu dźwięków otwarcia migawki.

L.p.	Czas	Interwał	Różnica ¹⁾	Różnica ¹⁾
0	2,7510	-	-	-
1	3,1801	0,4291	0,27	0,06%
2	3,6089	0,4288	-0,06	-0,01%
3	4,0380	0,4291	0,27	0,06%
4	4,4666	0,4286	-0,25	-0,06%
5	4,8950	0,4285	-0,40	-0,09%
6	5,3238	0,4287	-0,12	-0,03%
7	5,7530	0,4292	0,35	0,08%
8	6,1818	0,4289	0,01	0,00%
9	6,6109	0,4291	0,21	0,05%
10	7,0393	0,4284	-0,42	-0,10%
11	7,4684	0,4291	0,24	0,06%
12	7,8972	0,4288	-0,06	-0,01%
13	8,3262	0,4290	0,16	0,04%
14	8,7550	0,4288	-0,08	-0,02%
15	9,1838	0,4288	-0,03	-0,01%
16	9,6130	0,4292	0,39	0,09%
17	10,0414	0,4283	-0,51	-0,12%
18	10,4704	0,4290	0,16	0,04%
19	10,8993	0,4289	0,05	0,01%
20	11,3285	0,4292	0,36	0,08%
21	11,7570	0,4285	-0,38	-0,09%
22	12,1860	0,4291	0,22	0,05%
23	12,6146	0,4285	-0,33	-0,08%
24	13,0434	0,4289	0,04	0,01%
25	13,4723	0,4289	0,04	0,01%
26	13,9015	0,4292	0,30	0,07%
27	14,3296	0,4281	-0,76	-0,18%
28	14,7589	0,4293	0,47	0,11%
29	15,1877	0,4288	-0,03	-0,01%
30	15,6169	0,4292	0,37	0,09%
31	16,0457	0,4288	-0,08	-0,02%
32	16,4742	0,4285	-0,39	-0,09%
33	16,9035	0,4293	0,45	0,10%
34	17,3323	0,4288	-0,06	-0,01%
35	17,7610	0,4288	-0,06	-0,01%
36	18,1898	0,4287	-0,14	-0,03%
37	18,6180	0,4283	-0,57	-0,13%
38	19,0474	0,4294	0,51	0,12%
39	19,4762	0,4289	0,00	0,00%
40	19,9048	0,4286	-0,25	-0,06%
41	20,3338	0,4290	0,14	0,03%
42	20,7629	0,4290	0,17	0,04%
43	21,1915	0,4286	-0,25	-0,06%
44	21,6205	0,4290	0,18	0,04%
45	22,0495	0,4290	0,19	0,04%
46	22,4786	0,4291	0,25	0,06%
47	22,9072	0,4286	-0,30	-0,07%
48	23,3362	0,4290	0,17	0,04%
49	23,7648	0,4286	-0,29	-0,07%

50	24,1937	0,4290	0,12	0,03%
51	24,6226	0,4289	0,03	0,01%
52	25,0511	0,4285	-0,38	-0,09%
53	25,4802	0,4291	0,28	0,06%
54	25,9092	0,4290	0,17	0,04%
55	26,3379	0,4287	-0,17	-0,04%
56	26,7669	0,4290	0,11	0,03%
57	27,1958	0,4289	0,07	0,02%
58	27,6245	0,4287	-0,12	-0,03%
59	28,0534	0,4289	0,02	0,00%
60	28,4825	0,4291	0,22	0,05%
61	28,9110	0,4285	-0,32	-0,08%
62	29,3396	0,4286	-0,27	-0,06%
63	29,7687	0,4292	0,33	0,08%
64	30,1973	0,4286	-0,25	-0,06%
65	30,6263	0,4289	0,08	0,02%
66	31,0554	0,4292	0,30	0,07%
67	31,4842	0,4288	-0,04	-0,01%
68	31,9129	0,4287	-0,20	-0,05%
69	32,3418	0,4289	0,03	0,01%
70	32,7706	0,4288	-0,01	0,00%
71	33,1993	0,4287	-0,18	-0,04%
72	33,6284	0,4291	0,24	0,06%
73	34,0572	0,4288	-0,01	0,00%
74	34,4863	0,4291	0,23	0,05%
75	34,9152	0,4289	0,09	0,02%
76	35,3440	0,4288	-0,10	-0,02%
77	35,7724	0,4284	-0,47	-0,11%
78	36,2013	0,4289	0,08	0,02%
79	36,6303	0,4291	0,20	0,05%
80	37,0594	0,4290	0,20	0,05%
81	37,4882	0,4288	-0,05	-0,01%
82	37,9168	0,4286	-0,27	-0,06%
83	38,3459	0,4291	0,29	0,07%
84	38,7745	0,4286	-0,27	-0,06%
85	39,2036	0,4291	0,27	0,06%
86	39,6325	0,4289	0,03	0,01%
87	40,0613	0,4288	0,00	0,00%
88	40,4902	0,4289	0,00	0,00%
89	40,9192	0,4291	0,21	0,05%
90	41,3476	0,4284	-0,49	-0,11%
91	41,7764	0,4288	-0,05	-0,01%
92	42,2056	0,4292	0,39	0,09%
93	42,6342	0,4285	-0,34	-0,08%
94	43,0630	0,4289	0,04	0,01%
95	43,4921	0,4291	0,23	0,05%
96	43,9213	0,4292	0,33	0,08%
97	44,3500	0,4287	-0,19	-0,04%
98	44,7781	0,4281	-0,75	-0,18%
99	45,2073	0,4292	0,39	0,09%
100	45,6362	0,4289	0,00	0,00%

¹⁾ Różnica w stosunku do wartości średniej.

Tabela 7. Statystyka wysokości tablicy rejestracyjnej nad poziomem jezdni.

Lp	Wysokość nad jezdnią	Różnica ¹⁾
1	28,66	12,97
2	34,95	6,68
3	25,01	16,62
4	36,41	5,23
5	92,73	-51,10
6	35,57	6,06
7	42,81	-1,17
8	40,92	0,72
9	36,85	4,79
10	36,57	5,07
11	37,34	4,29
12	40,11	1,52
13	58,57	-16,93
14	37,82	3,82
15	42,96	-1,33
16	38,50	3,14
17	39,85	1,79
18	38,83	2,80
19	39,35	2,28
20	36,24	5,39
21	39,94	1,69
22	40,37	1,26
23	41,42	0,21
24	36,41	5,23
25	41,65	-0,01
26	40,36	1,27
27	39,73	1,91
28	39,24	2,39
29	40,58	1,06
30	43,14	-1,51
31	38,71	2,92
32	41,58	0,05
33	28,90	12,73
34	35,93	5,70
35	47,00	-5,36
36	34,95	6,68
37	35,64	6,00
38	42,57	-0,93
39	39,29	2,34
40	40,28	1,36
41	38,42	3,21
42	42,86	-1,23
43	41,32	0,32
44	42,50	-0,86
45	40,82	0,81
46	41,26	0,38
47	37,01	4,62
48	44,58	-2,95
49	36,71	4,93

50	35,98	5,65
51	36,29	5,34
52	37,43	4,21
53	37,98	3,65
54	22,10	19,54
55	39,65	1,99
56	40,56	1,08
57	39,70	1,93
58	39,02	2,61
59	41,53	0,10
60	41,42	0,21
61	36,28	5,36
62	47,96	-6,32
63	35,96	5,68
64	90,72	-49,09
65	43,86	-2,22
66	40,00	1,63
67	39,81	1,82
68	34,51	7,12
69	40,17	1,46
70	42,23	-0,59
71	41,15	0,48
72	40,09	1,55
73	94,57	-52,94
74	57,97	-16,33
75	39,50	2,13
76	42,87	-1,24
77	35,83	5,80
78	26,79	14,85
79	34,53	7,11
80	41,75	-0,11
81	44,52	-2,88
82	37,46	4,17
83	41,50	0,13
84	38,18	3,46
85	35,22	6,42
86	35,50	6,13
87	37,28	4,35
88	32,71	8,92
89	47,09	-5,45
90	32,14	9,50
91	39,41	2,22
92	45,27	-3,63
93	37,12	4,51
94	34,26	7,37
95	40,50	1,14
96	39,57	2,06
97	39,18	2,45
98	134,76	-93,13
99	39,06	2,57
100	41,26	0,37

¹⁾ Różnica w stosunku do wartości średniej.