# POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka

SPECJALNOŚĆ: Technologie informacyjne w systemach automatyki

PRACA DYPLOMOWA

MAGISTERSKA

Badanie metod rozpoznawania znaków drogowych z wykorzystaniem wielu źródeł obrazu  
Research on traffic sign recognition methods using multiple image source

autor : BARTOSZ LENARTOWICZ

autor : BARTOSZ LENARTOWICZ

Opiekun pracy:

Dr inż. Bartosz Jabłoński W04/K8

OCENA PRACY:

WROCŁAW 2019

# Streszczenie

[here] (streszczenie na sam koniec)

**Spis treści**

[POLITECHNIKA WROCŁAWSKA 1](#_Toc2762487)

[KIERUNEK: Automatyka i Robotyka 1](#_Toc2762488)

[PRACA DYPLOMOWA 1](#_Toc2762489)

[MAGISTERSKA 1](#_Toc2762490)

[Dr inż. Bartosz Jabłoński W04/K8 1](#_Toc2762491)

[WROCŁAW 2019 1](#_Toc2762492)

[Streszczenie 2](#_Toc2762493)

[Analiza problemu, cel i zakres pracy 3](#_Toc2762494)

[Metody detekcji obiektów na obrazach panoramicznych 4](#_Toc2762495)

[Algorytmy łączenia obrazów w panoramę 4](#_Toc2762496)

[Metody klasyczne 5](#_Toc2762497)

[Metody bazujące na punktach charakterystycznych 7](#_Toc2762498)

[Łączenie obrazów 9](#_Toc2762499)

[Segmentacja obrazów 10](#_Toc2762500)

[Wykrywanie na podstawie koloru 10](#_Toc2762501)

[Wykrywanie na podstawie kształtu 13](#_Toc2762502)

[Wykrywanie na podstawie tekstury 14](#_Toc2762503)

[Podejście hybrydowe 15](#_Toc2762504)

[Inne podejścia 17](#_Toc2762505)

[Wnioski 18](#_Toc2762506)

[Klasyfikacja znaków drogowych 18](#_Toc2762507)

[Sieci neuronowe 18](#_Toc2762508)

[SVM 21](#_Toc2762509)

[GA 21](#_Toc2762510)

[K-d Tree 21](#_Toc2762511)

[Podsumowanie 21](#_Toc2762512)

[Program 22](#_Toc2762513)

[Propozycja rozwinięcia/konstrukcji metody 22](#_Toc2762514)

[Przygotowanie środowiska badawczego i plan badań 22](#_Toc2762515)

[Podsumowanie 22](#_Toc2762516)

[Bibliografia 22](#_Toc2762517)

# Analiza problemu, cel i zakres pracy

Rozpoznanie znaków drogowych przez algorytmy przetwarzania obrazów jest aspektem niosącym ze sobą wiele korzyści, szczególnie jeżeli analiza następuje w czasie rzeczywistym. Pierwszą korzyścią jaka się nasuwa jest wspomaganie kierowców podczas jazdy ADAS (ang. advanced driver assistance system). Po nieco dłuższym zastanowieniu można wywnioskować, że rozpoznawanie znaków jest niezbędne również dla autonomicznych pojazdów. Dodatkowo rozpoznanie znaków drogowych może realnie przyczynić się do polepszania bezpieczeństwa na drodze. Przykładowo po rozpoznaniu znaku drogowego można zbadać w jakim stopniu jest on czytelny np. czy nie został zamazany, zakrzywiony. Jeżeli tak się stało można poinformować o tym służbę drogową. Istnieje szereg dziedzin gdzie analiza znaków drogowych może wprowadzić wiele innowacji. Prawdopodobnie dlatego inżynierowie od ponad dwóch dekad starają się sprostać temu zadaniu. Jedna z pierwszych prac nad systemem została przedstawiona w roku 1996 w pracy [1]. W niniejszej pracy zostało przedstawione kilka metod, które starają się sprostać zadaniu rozpoznawania znaków drogowych na obrazie.

Starając się wyjaśnić zakres pracy magisterskiej należy również rozszerzyć kilka terminów, które zostały w niej poruszone. W literaturze problem rozpoznawania znaków drogowych przedstawia się jako problem TSR (ang. Traffic Sign Recognition). Jest on składową większego zagadnienia jakim jest analiza sytuacji w okuł samochodu podczas jazdy, a czasem nawet wewnątrz niego. W takim przypadku obszar wokół samochodu traktowany jest jako scena w, której należy rozpoznawać i analizować obiekty na niej umieszczone. Zostaje to wspomniane, ponieważ niektóre systemy prócz rozpoznania znaków drogowych są w stanie rozpoznawać obiekty takie jak samochody, rowerzystów czy pieszych. Przykład takiego systemu został przedstawiony w pracy [2]. Zaletą innych systemów analizy sceny TSR jest możliwość śledzenia obiektów np. w celu poinformowania kierowców o kursie kolizyjnym. Śledzenie pozwala również zapobiec wykrycia kilkukrotnie tego samego obiektu. Według autorów pracy [3] aspekt śledzenia jest szczególnie ważny dla systemów, w których pojazd jest kierowany przez kierowcę (a nie przez algorytm). Wielokrotne informowanie kierowcy o znaku może rozproszyć jego uwagę powodując tym samym zagrożenie. Autorzy w swojej pracy wspominają, że traktowanie kierowcy jako integralną część środowiska może polepszyć parametry systemu.

Chcąc zrealizować w skończonym czasie pracę należało wprowadzić pewne ograniczenia. Pierwszym z nich jest problem wykrywania obiektów zawężony do problemu TSR. Dodatkowo w pracy główny nacisk został położony na wykrywanie znaków pionowych. Warto również na początku zaznaczyć, że skuteczność proponowanego algorytmu była większym kryterium niż jego szybkość.

Główną ideą pracy jest sprawdzenie jaki wpływ na problem TSR ma zastosowanie większej ilości kamer. Obrazy zostały zarejestrowane przez kamery cyfrowe obejmujące obszar przed samochodem [here](oraz części prawego pobocza?). Klatki utrwalone w tym samym czasie zostały wyselekcjonowane i połączone w obraz panoramiczny. Na obrazie panoramicznym nastąpiła detekcja znaków drogowych.

Warto zwrócić też uwagę na fakt, że system, który jest w stanie wykryć kilka różnych typów znaków lecz jest obarczony dużym błędem wykrywalności, w niektórych zastosowaniach może być uważany za lepszy niż system, który może wykryć tylko jeden określony typ znaku, ale robi to bardzo dobrze. Oczywiście możliwa jest również sytuacja odwrotna.

Skupiając się na problemie badawczym czyli wpływie zastosowania kilku kamer, zamiast kamery pojedynczej, należało przyjąć pewne kryteria oceny. Problem oceny został ujęty jako zagadnienie statystyczne. Hipotezą zerową było stwierdzenie, że w przeszukiwanym obszarze nie ma znaków drogowych. Z pozoru nielogiczne założenie wprowadziło kilka udogodnień w rozumowaniu. Tak potraktowane zagadnienie poskutkowało tym, że błędami pierwszego rodzaj było wykrycie znaków drogowych gdzie w rzeczywistości ich nie ma. Błędem drugiego rodzaju zostało ominięcie znaku drogowego na obszarze gdzie w rzeczywistości on występuje.

Ważnym aspektem do testowania algorytmów jest ujednolicona baza danych, ponieważ dopiero na jednolitej bazie danych można określić skuteczność algorytmu. Istnieje kilka publicznie dostępnych zestawów danych znaków drogowych poniżej podano kilka publicznych baz znaków drogowych:

* GTSRB - Niemiecki test TSR,
* KUL Belgium - Zestaw danych znaków drogowych,
* STS - Szwedzki zestaw danych znaków drogowych,
* RUG Traffic Sign - Baza danych obrazów,
* Baza danych Stereopolis.

Najważniejszą bazą danych z pozycji tej pracy jest baza danych GTSRB, ponieważ większość algorytmów przedstawionych w pracy była właśnie testowana na tej bazie danych.

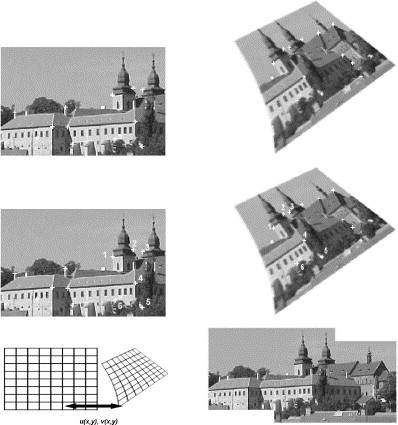
# Metody detekcji obiektów na obrazach panoramicznych

Problem identyfikacji obiektów na obrazach panoramicznych pociąga za sobą szereg zagadnień do zrealizowania. Pierwszym z nich jest stworzenie obrazu panoramicznego z kilku ujęć otoczenia. Po stworzeniu panoramy należy rozpoznać co znajduje się na obrazie. Zagadnienie rozpoznania obrazu w większości przypadków realizowane jest w trzech krokach. Pierwszym krokiem jest przetwarzanie wstępne tz. nisko-poziomowe. Podczas takiego przetwarzania następuje np. akwizycja obrazu i w ogólności przetwarzanie-nisko-poziomowe ma na celu poprawę jakości obrazu poprzez eliminację zakłóceń, poprawę kontrastu, filtrację itp. Kolejny krok nazwany przetwarzaniem średniego poziomu i dotyczy segmentacji obrazu. Podczas segmentacji wydzielone zostają cechy obrazu. Przykładowo znajduje się punkty kluczowe lub obszary, w których mogą wystąpić obiekty. Po segmentacji następuje próba rozpoznania i klasyfikacji obiektu. Bardziej zaawansowane metody pracujące na filmach posiadają również etap śledzenia wykrytych obiektów. Ponieważ każdy etapów przetwarzania obrazów można traktować jako oddzielny problem, poniżej w osobnych podrozdziałach zostały przedstawione metody rozwiązania każdego zagadnienia.

## Algorytmy łączenia obrazów w panoramę

Istnieje szereg algorytmów starających się sprostać problemowi dopasowania kilku obrazów do siebie. Istotną cechą poszukiwanego algorytmu powinna być odporność na różnicę w jasności w obrazach wejściowych oraz szumy spowodowane drganiami i rotacją oraz zabrudzeniami typu: błoto, kurz, krople wody. W wielu pracach np. [4] łączenie obrazów w panoramę zostaje podzielone na kilka etapów. W artykule starano się uniwersalną metodę mogącą łączyć obrazy tej samej sceny uzyskane w różnych czasach, z różnych punktów widzenia lub zarejestrowane różnymi czujnikami. Według pracy proponuje się cztery etapy łączenia obrazów przedstawione poniżej oraz przedstawione na rysunku Rysunek 1:

* Wykrywanie cech kluczowych gdzie wykrywa się np. kontury, narożniki, centra grawitacji, punkty kluczowe.
* Dopasowywanie cech gdzie ustalana jest zgodność między cechami wykrytymi w wykrytym obrazie i wykrytymi w obrazie odniesienia. W tym celu używane są różne deskryptory funkcji i podobieństwa oraz relacje przestrzenne między funkcjami.
* Ujednolicenie dwóch modeli. Na tym etapie przekształca się oba obrazy w taki sposób by można było połączyć je w całość za pomocą funkcji odwzorowania. Funkcje odwzorowania umożliwiają wyrównanie obrazów, a nawet zniwelowanie odkształceń. Parametry funkcji odwzorowania są obliczane za pomocą ustalonej zgodności cech.
* Ponowne próbkowanie obrazu i transformacja. Obrazy są transformowane za pomocą funkcji odwzorowania. Wartości obrazu w niecałkowitych współrzędnych są obliczane za pomocą odpowiedniej techniki interpolacji.



Rysunek 1Przedstawienie 4 kroków tworzenia obrazów

W każdym etapie należy zadecydować, które funkcje będą najskuteczniejsze. Warto pamiętać, by wybrany algorytm wykrywał te same cechy kluczowe na obu obrazach, przy czym każdy z obrazów może być odmiennie zaszumiony. W tej fazie poprzez ekstrakcje cech szczególnych klatki wyłania się punkty kluczowe, niezmiennicze bądź krawędzie obiektów służące do dopasowania obrazów. Po dopasowaniu obrazów następuje fuzja właściwa powodująca scalenie obrazu w panoramę. Warto zaznaczyć, że wyekstraktowane cechy mogą posłużyć w kolejnych etapach do identyfikacji obiektów.

Dziedziną, z której można czerpać inspirację dla fuzji jest medycyna. Przykładem, który można podać jest tomografia lub rezonans magnetyczny, gdzie nie dość, że pojedyncze klatki obrazów są łączone w taki sposób by tworzyć obraz 3-D to jeszcze często na potrzeby dokładniejszej rozeznania łączy się obrazy 3-D z różnych źródeł. Artykuł [5] przedstawia metodę Powella z użyciem metody Brenta na potrzeby łączenia obrazów medycznych.

Poniżej zostały omówione różne algorytmy tworzenia panoramy. Wpierw została przedstawiona idea metod klasycznych, dziś o znaczeniu historycznym. Następnie zaprezentowano metody bazujących na punktach kluczowych, charakterystycznych. Są to metody najpopularniejsze mające największe znaczenie w rzeczywistości.

### Metody klasyczne

Metody klasyczne dopasowują obrazy do siebie poprzez wyznaczenie maksimum miary dopasowania pomiędzy cechami wykrytymi na obu obrazach gdzie dopasowanie wykonuje się głównie metodami optymalizacji funkcji. Najprostszym algorytmem do wykrywania cech obrazu jest detektor Canny pozwalający wychwycić krawędzie, zaś najprostszą metodą wyznaczenia miary dopasowania jest suma kwadratów. W istocie obrazy stara się dopasować do siebie starając się zminimalizować błąd średniokwadratowy przez dopasowanie linii na obu obrazach. Wyznaczenie zbieżności funkcji w wielu przypadkach możliwe jest za pomocą różnych metod np. Gaussa-Newtona, Levenberga-Marquardta. Takie dopasowanie obrazów niesie ze sobą wiele problemów, dlatego starano się znaleźć lepsze metody łączenia obrazów.

W pracy [6] został zaproponowany algorytm do łączenia klatek filmowych tego samego obszaru nagrywanych różnymi kamerami (autorzy testowali algorytm na dwóch kamerach – TV i IR), jednak możliwe jest przystosowanie algorytmu do tworzenia panoramy. Algorytm przeskalowuje obrazy do jednej wielkości, a następnie poddaje je filtrowi krawędziowemu. Autorzy pracy nie podają jaki dokładnie filtr był zastosowany. Następnie jeden obraz zostaje podzielony na pionowe wycinki i każdy wycinek stara się dopasować do obrazu drugiego. Najlepsze dopasowanie każdego odcinka wyznacza się za pomocą sumy najmniejszych kwadratów lub sumy modułów różnic. Następnie za pomocą jednej z metod: średniej, mediany lub dominanty wybiera się najlepsze dopasowanie ogólne. Na podstawie dopasowania ogólnego zostaje wyznaczona translacja pozioma obrazów. Warto zaznaczyć, że dominanta uzyskała najlepsze wyniki dopasowania. Gdy obrazy zostają przesunięte o wyznaczoną wartość i proceder powtarza się w pionie. Algorytm jest słabo odporny na rotację lecz jego największą zaletą jest szybkość.

Można również wspomnieć o metodzie przedstawionej w artykule [7]. W skrócie metoda polega podzieleniu obu obrazów na niewielkie obszary i dopasowaniu obrazów do siebie za pomocą szybkich, mało dokładnych metod z wykorzystaniem miary statystycznej korelacji. Następnie używając metod bardziej złożonych obliczeniowo ale dokładniejszych łączy się segmenty w całość i znajduje najlepsze globalne dopasowanie. Autorzy algorytmu w opisie przedstawiają, że algorytm wykorzystuje metodę quasi-Newtona, z piramidą obszarów. Takie łączenie obrazów pozwala na większą eliminację błędów.

### Metody bazujące na punktach charakterystycznych

Metody łączenia obrazów, które posiadają większą odporność na zakłócenia bazują na ekstrakcji cech. W literaturze punkty charakterystyczne nazywane są również punktami, kluczowych bądź kontrolnymi CP (ang. Control Point). Cechy takie rozumiane są jako specyficzne konfiguracje pikseli układające się w struktury. Przykładami takich konfiguracji mogą być: zakończenia linii, krawędzie lub kąty. Wykrywanie struktur zazwyczaj następuje za pomocą filtracji obrazu. Fragmenty obrazu, które nie zmieniają się podczas przekształceń obrazu nazywane są punktami kluczowymi. Ważnym elementem punktów kluczowych jest to ich skalo-niezmienniczość.

#### Detektor Harris’a

Jako punkty charakterystyczne można wykorzystać narożniki wykryte na obrazach. Detektor Harrisa, który jest ulepszoną wersją detektora Moraveca z powodzeniem wykrywa narożniki. Koncepcja detektora Moraveca polega na przeszukiwaniu obrazu z wykorzystaniem okna przeszukiwania ROI (ang. Region of Interest). Gdy podczas przeszukiwania w jednym kierunku zostanie zauważona duża zmiana w jasności pikseli obszar zostaje zakwalifikowany jako krawędź. Jeżeli zmiana zostanie również zauważona w kierunku prostopadłym to obszar kwalifikuje się jako narożnik. Zmiany intensywności sprawdza się co 45˚ co jest istotną wadą. W detektorze Moraveca wadami są również zaszumiona odpowiedź z uwagi na binarną funkcję okna oraz minimum jako kryterium. Chcąc poprawić algorytm Chris Harris w 1988 roku zaproponował ulepszoną wersję algorytmu z powodzeniem stosowaną do dnia dzisiejszego. W detektorze Harrisa wykorzystywana jest macierz autokorelacji w postaci:

gdzie I jest funkcją intensywności, a σ jest odchyleniem standardowym funkcji Gaussa. Jeżeli różnica między wyznacznikiem macierzy M, a kwadratem jej śladu przemnożonym przez stałą k ( ) będzie mniejsza od zera to punkt jest uważany za krawędź. Jeżeli zaś to punkt uważany jest za narożnik. Jeżeli punkt jest bliski zera to uważa się, że obszar nie posiada znaczących zmian. Dodatkowo dla większej dokładności algorytmu wykrywania narożników wprowadza się próg . Zaleca się również wybrania punktów z lokalnym maksimum. Detektor Harrisa wykrywa narożniki z wiele większą dokładnością niż detektor Moraveca oraz sprawdza narożniki pod każdym kątem. Algorytm może z powodzeniem zostać wykorzystywany do tworzenia panoram.

#### GFTT

Algorytm GFTT (ang. - Good Features To Track) jest kolejnym ulepszeniem jakie wprowadzili Jianbo Shi oraz Carlo Tomasi w 1994 roku dla detektora Harrisa. Na potrzeby algorytmy wymaga się by obraz wejściowy był czarno biały. Zmianie w odniesieniu do oryginalnego algorytmu polegała na zastosowaniu innego wzoru wyliczającego funkcje oceniającą. Zamiast jak w oryginale w przypadku GFTT funkcja ta ma postać

Dzięki swojej modyfikacji algorytm znajduje najbardziej użyteczne wierzchołki obrazu. Każdy wykryty wierzchołek sprawdzana się czy przekroczył pewien próg zmiany jasności i jeżeli tego nie zrobił zostaje automatycznie odrzucony. Dodatkowo określa się minimalny dystans pomiędzy wierzchołkami. Kryteria pozwalają wyłonić najlepiej procentujące wierzchołki, czyli intersujące punkty kluczowe.

#### FAST

Detektor FAST (ang. Features from Accelerated Segment Test) w swoim kryterium porównuje jasność piksela z jasnością pikseli oddalonych o ustalony promień. W przypadku gdy jasność większości pikseli będzie się różnić od piksela centralnego o określoną wartość to punkt kwalifikowany jest jako narożnik. Przykładowo dla promienia równego 3 piksele jeżeli 12 z 16 pikseli będą jaśniejsze niż piksel centralny pomniejszony o pewną wartość to algorytm wykrył narożnik. Na potrzeby algorytmu promień powinien być dostatecznie mały (od 2 do 6 pikseli) oraz wartość progu kwalifikacji i ilości pikseli odpowiednio przeskalowana do promienia. Algorytm FAST osiąga przeciętne wyniki w wykrywaniu punktów kluczowych lecz jego zaletą jest szybkość.

#### SIFT

Algorytmem który wykorzystuje punkty charakterystyczne na którego należało by zwrócić szczególną uwagę jest zaproponowany przez David Lowe algorytm SIFT (ang. Scale Invariant Feature Transform) [8]. Jest to jeden z bardziej popularnych algorytmów dlatego jego działanie zostało przybliżone w tym akapicie. Jak większość opisywanych algorytmów tak i ten prócz tworzenia panoramy z powodzeniem można zastosować do rozpoznawania obiektów. Algorytm SIFT realizowany jest w czterech krokach. Kroki zostały wpierw przedstawione, a następnie szczegółowo opisane. Pierwszy krok nazwany „scale space extrema detection” wykrywa punkty ekstremalne na dwóch obrazach. W kroku drugim „accurate keypoint location” następuje dokładna lokalizacja punktów charakterystycznych. Następnie przypisuje się orientację wykrytym punktom w przestrzeni. Krok nazwany jest „keypoint orientation assignment”. Czwarty etap zawiera tworzenie deskryptorów dla punktów charakterystycznych. Szczegółowe omawianie algorytmu należy zacząć od procesu skalowania obrazu wejściowego do różnych wielkości. Dla każdego obrazu w skali zostaje użyty filtr Laplace’a, który pozwala uzyskać kontury obiektów , obliczany za pomocą odjęcia dwóch obrazów rozmytych filtrem Gaussa z różnymi parametrem σ. Zazwyczaj większe rozmycie obrazu tworzy się poprzez zwiększenie potęgi do której zostanie podniesiona stała k. Dla ułatwienia zrozumienia poniżej opisano wzór

Zazwyczaj w za parametr odchylenia standardowego przyjmuje się . Stała podnoszona do kolejnych potęg. Następnie przez binaryzację wykrywa się lokalne maksima i minima. Taka operacja powoduje wykrycie ogromnej ilości punktów ekstremalnych dlatego należy zastosować dwa kryterium, które odfiltrują najlepsze możliwe punkty charakterystyczne. Pierwsze kryterium odrzuca płytkie minima bądź niewielkie maksima za pomocą rozwinięcia funkcji w szereg Taylora. Dzięki temu odrzucone punkty, które powstały na obszarze np. nieba. Drugie kryterium sprawdza czy punkt nie leży na odcinku za pomocą detektora Harris’a. Po tym etapie wyłonione zostają punkty niezmiennicze. Algorytm przypisuje punktom orientację co powoduje niezmienniczość również względem orientacji. Można więc ustawić obrazy tak by odpowiadające sobie punkty charakterystyczne na każdym obrazie wskazywały jednakowy kierunek. Realizowane jest to poprzez wyznaczenie gradientu w punkcie charakterystycznym. Następnie wyznacza się gradienty w małym otoczeniu punktu charakterystycznego i z odpowiednio wyważonych gradientów tworzy się histogram. Z histogramu powstaje deskryptor który pozwala wyznaczyć orientację obszaru przetwarzanego w końcowym etapie. Etap końcowy polega na tworzeniu ostatecznych deskryptorów. Najczęściej przetwarzaniu podlega rozmyty wejściowy obraz. Etap przypomina ten poprzedni lecz otoczenie punktu charakterystycznego jest dużo większe i podzielone na cztery obszary. W każdym obszarze wyznacza się osobne deskryptory co kończy algorytm. Uzyskuje się w ten sposób punkty charakterystyczne wraz z dokładną orientacją.

### Łączenie obrazów

Chcąc zakończyć tematykę tworzenia panoramy należało by wspomnieć w jaki sposób za pomocą metod klasycznych oraz tych bazujących na punktach kluczowych zostaje utworzony jednolity obraz panoramiczny. Nie trudno zauważyć, że w każdej z metod wykryte cechy pozwalają dopasować obrazy do siebie. Następnie nakłada się jeden obraz na drugi w taki sposób by występowała największa liczba pasujących elementów np. wykrytych linii, krawędzi, narożników czy deskryptorów. Obrazy zostają scalone w jeden tz. dokonuje się ich fuzji. Zazwyczaj scalenie polega na przysłonięciu części obrazu drugim obrazem. Istnieją również prace, które starają się wspólny obszar zapełnić informacjami z obu obrazów lecz takie rozwiązanie może spowodować pogorszenie się jakości obrazu.

### Podsumowanie

Problem tworzenia panoramy na potrzeby pracy niesie ze sobą wiele udogodnień. Z dość dużą dokładnością znana jest translacja pozioma obu obrazów. Translacja pionowa praktycznie nie występuje. Przez to, że teoretycznie kamery zamocowane są statycznie na aucie znamy obszar w którym obrazy z kamer się nakładają. Umożliwia to wykonywanie operacji dopasowania tylko na wspólnym obszarze rejestrowanym przez obie kamery co pozwoli zmniejszyć ilość obliczeń. Przez wprowadzone ograniczenia metody klasyczne nie zostały odrzucone. Metody bazujące na punktach charakterystycznych wydają się być najbardziej obiecujące.

## Segmentacja obrazów

Segmentacja obrazów polega na znalezieniu obszaru, w którym występuje poszukiwany obiekt. W przypadku systemu TSR segmentacja obrazów polega na znalezieniu na obrazie znaku drogowego. By takie wykrywanie mogło mieć miejsce należy wyznaczyć zbiór cech tworzący jakościowy i ilościowy opis obiektu (znaku drogowego). Taki opis nazywany jest wzorcem. Zapisuje się go za pomocą wektora cech: ]. Dla ułatwienia opisu obiektów zostają również wprowadzone klasy wzorców, zawierające wzorce z podobnymi wektorami cech. Klasę wzorców oznacza się za pomocą (M - numer klasy). Rozpoznanie wzorców nazwane klasyfikacją polega na przyporządkowaniu wzorców do ich klas. Wyznaczenie wzorców powinno się opierać o starannie dobrane cechy. Cechy takie powinny mieć specyficzne własności. Ważne jest by wybrane cechy przypisane do obiektu przyjmowały różne wartości dla różnych klas obiektów. Ważnym atrybutem każdej cechy powinna być jej niezawodność. Niezawodność powinna polegać na przyjmowaniu podobnych wartości dla wszystkich obiektów danej klasy. Dodatkowo cechy wybrane wzorca powinny być nieskorelowane ze sobą. Skorelowanie można opisać za pomocą współczynnika korelacji: gdzie P oznacza liczbę klasyfikowanych obiektów, μ wartości średnie, a σ odchylenie standardowe zbioru cech. Jeżeli współczynnik korelacji To cechy x i y uważa się za silnie skorelowane i jedną z nich można odrzucić. Ważne jest by dla obiektu nie przyjmować zbyt dużej ilości cech, ponieważ złożoność obliczeniowa detektorów obiektów rośnie wraz z ilością cech. Wykrywanie obiektów na obrazach może się odbywać na wiele sposobów. Kilka metod wykrywania i rozpoznawania obiektu zostały przedstawione poniżej. Wpierw zostało omówione podejście na podstawie koloru, a następnie kształtu. Zazwyczaj metoda wykrywania obiektu jest ściśle połączona z metodą rozpoznawania obiektu. Niekiedy używa się połączenia metod opartych na różnych podejściach. Oznacza to, że wpierw zostaje wykonane progowanie w określonym kolorze, a następnie rozpoznaje się kształty wyłonione przez progowanie. Podczas progowania najczęściej zostają odnalezione grupy pikseli nie powiązane ze sobą. By zlokalizować obiekty odnalezione przez progowanie należy w jakiś sposób połączyć piksele ze sobą i je oznaczyć. Dość prostą i skuteczną metode przedstawiono w pracy [9] gdzie do każdego odnalezionego piksela zostaje przypisana etykieta. Algorytm etykietowania wprowadza osobny bufor umożliwiający łączenie regionów z różnymi etykietami.

### Wykrywanie na podstawie koloru

Wykrywanie obiektów na podstawie koloru najczęściej stosuje się w przypadku kolor obiektu jest nieskomplikowany i dobrze określony. Jak wiadomo posiada z góry określone kolory, dlatego znaczna część proponowanych algorytmów wykorzystuje tą zaletę. Najpopularniejszą metodą wykrywania obiektów na podstawie koloru jest progowanie obrazu w określonej barwie. Zaletą progowania jest jego szybkość. Ważnym jest by kolor znacząco odróżniał się od tła. Znaczna część prac [9] [10] [here](progowanie) wykorzystuje progowanie obrazu w kolorze czerwonym. Określenie koloru może być zrealizowane za pomocą kilku sposobów lecz zazwyczaj wykonuje się to ręcznie przez pobranie próbek z kilku wzorcowych obiektów. Następnie wyznaczony zostaje średni kolor i możliwy zakres odchylenia od wzorca. Warto zauważyć, że progowanie jest mało odporne na wszelkiego typu zakłócenia, ponieważ kolor obiektu w dużej mierze zależy od oświetlenia. By zaradzić problemowi zmiany oświetlenia w zależności od warunków część algorytmów wykorzystuje możliwość zmiany przestrzeni barw.

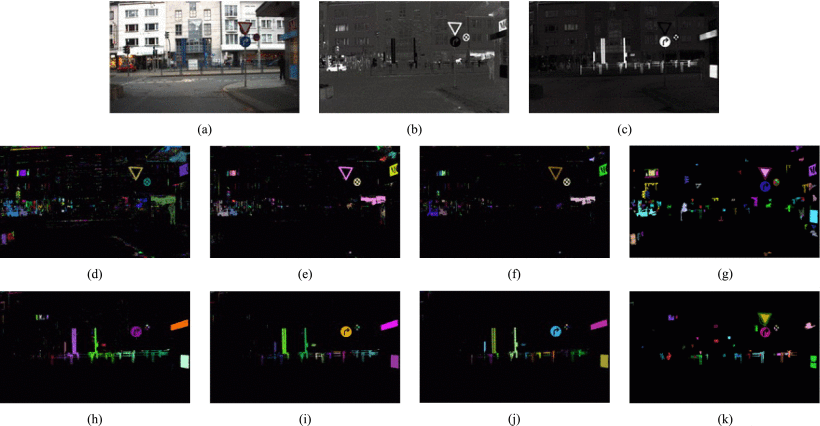
#### Zmiana przestrzeni barw

Przestrzeń barw RGB (ang. Red, Green, Blue) jest bardzo zmienna w zależności od warunków panujących na drodze. Pogoda, pora dnia lub mnogość różnokolorowych źródeł światła mogą spowodować zmianę odbieranych przez kamerę kolorów co dla progowania jest niedopuszczalne. Część algorytmów przed progowaniem wstępnie obrabia obraz stosując techniki tj. rozciągnięcie histogramu. Metody te są jednak mało skuteczne dlatego część naukowców badających temat TSR postanowiło przejść z przestrzeni barw RGB na HSI (ang. Hue, Saturation, Intensity) lub HSV (ang. Hue Saturation Value). Takie modele barw pozwalają w pewnym stopniu zniwelować wahania od zaburzeń świetlnych. Niestety przestrzeń te przestrzenie również nie są wolne od wad. Przykładowo nie uwzględniają temperatury barwy. Przestrzeń barw LCH (ang. Lightness, Chroma, Hue) uzyskana za pomocą modelu CIECAM97 pozwala uwzględnić temperaturę barw. Warto wspomnieć również o przestrzeni YUV, która posiada trzy kanały. Jeden kanał Y dostarczający luminację czyli jasność obrazu i dwa kanały U i V kodującą chrominancję czyli barwę. Algorytm bazujący na splotowej sieci neuronowej [11] wykorzystuje właśnie przejście na taką przestrzeń barw. By opis był pełny należy również zaznaczyć, że część autorów w swoich pracach stwierdza, że zmiana przestrzeni barw jest zbędna, ponieważ unormowana przestrzeń RGB w przeciętnych warunkach jest wystarczająca oraz koszt obliczeniowy związany ze zmianą przestrzeni barw jest zbyt duży.

Warto dodać że o wcześniej wspomnianej pracy [10], że model został oparty na kolorach ale nie na samym progowaniu. Algorytm używa zagnieżdżonej kaskady klasyfikatora Real AdaBoost, którą szkoli się za pomocą cech LRP (ang. Local Rank Pattern). Do obliczenia cech LRP wykorzystuje się siedem typów obrazów, gdzie każdy obraz tworzy się przez odjęcie jednego typu koloru (np. czerwonego, niebieskiego zielonego itp.) Algorytm AdaBoost został wykorzystany w ogromnej liczbie prac. Ten oparty na boostingu algorytm zaprezentowany został w 1996 roku przez  Yoav Freund i Robert Schapire [12] lecz wiele obecnych prac z niego korzysta. Główna idea polega na stworzeniu z wielu słabych klasyfikatorów jednego silnego klasyfikator.

#### Model prawdopodobieństwa barwy

Algorytm korzystający z modelu prawdopodobieństwa barw do wykrywania znaków drogowych został przedstawiony w pracy [13]. Algorytm tworzy mapę prawdopodobieństwa występowania znaku drogowego na podstawie poszukiwania kolorów znaków drogowych w obrazie. Następnie w regionach gdzie jest najwięcej poszukiwanych kolorów algorytm star się wykryć znak. Dodatkowo poszukiwanie koloru następuje w przestrzeni kolorów Otha, ponieważ taka przestrzeń lepiej sprawdziła się w eksperymentach autorów. Skanowanie w przestrzeni Otha zostało przedstawione na Rysunek 2.



Rysunek 2 Tworzenie mapy prawdopodobieństwa w przestrzeni Otha

Na wyżej pokazanym Rysunek 2 obraz (a) jest wejściowym obrazem kolorowym,  (b) i (c) są mapami prawdopodobieństwa uzyskanymi odpowiednio dla kolorów czerwonego i niebieskiego. Jak można zauważyć, czerwone i niebieskie piksele na oryginalnym obrazie mają duże natężenie co zostało potwierdzone na odpowiadającym im obrazach. Zastosowanie map prawdopodobieństwa powoduje zwiększenie kontrastu między znakami drogowymi, a tłem, dzięki czemu wykrywanie znaków drogowych jest łatwiejsze. Aby algorytm pracował w czasie rzeczywistym, przyśpiesza się obliczenia za pomocą tabeli wyszukiwania LUT (ang. Look Up Table). Podczas wykrywania oblicza się indeks każdego piksela według wartość RGB i znajduje odpowiadające mu prawdopodobieństwo w LUT. Przy pomocy tabeli LUT czas obliczenia map prawdopodobieństwa dla obrazu w rozdzielczości 1360×800 może zostać zredukowany z kilku minut do około 30 ms na normalnym komputerze (czterordzeniowy procesor Intel 3,4 GHz, 4 G RAM). Dodatkowo praca wykorzystuje detektor regionów MSER (ang. Maximally Stable Extremal Regions) aby na mapach prawdopodobieństwa zlokalizować miejsca występowania znaków. Działanie klasycznego detektora MSER przedstawione jest na obrazach (d) – (f), (h) – (j), a obrazy (g) i (k) przedstawiają detektor MSER rozpoznający znaki na obrazach prawdopodobieństwa. Po wykryciu regionów znaków następuje ich klasyfikacja do poszczególnych podklas poprzez maszynę wektorów nośnych przeszkolonych dla cech HOG z uwzględnieniem koloru. Algorytm HOG został przedstawiony w podrozdziale opisującym wykrywanie znaków na podstawnie tekstury, dlatego w tym miejscu nie został opisany.

#### SVF

SVF (ang. Simple Vector Filter) jest filtrem zaproponowanym w 2002 roku przez autorów artykułu [14] pozwalającym wyłonić obiekty z obrazu na podstawie informacji o kolorze w przestrzeni barw HSI. Jak można zobaczyć w artykule w połączeniu z filtrem krawędziowym pozwala dobrze usunąć tło pozostawiając same znaki. Do identyfikacji autorzy proponują metodę bazującą na algorytmie genetycznym.

### Wykrywanie na podstawie kształtu

Powszechnym podejściem w wykrywaniu obiektów na obrazach jest wykrywanie poprzez kształt. W przypadku takiego wykrywania kształt obiektu musi być konkretnie określony. Jak wiadomo znaki informacyjne są kwadratowe, nakazu lub zakazu okrągłe, a ostrzegawcze trójkątne, więc spełniają takie kryterium. Percepcja kształtów znaków różni się jednak od kąta obserwowania. Innym problemem przy wykrywaniu znaków na podstawie ich kształtu jest fakt iż podczas ich obserwacji mogą być częściowo przysłonięte lub na część znaku może padać, co zmienia ich wygląd. Ważnym jest by zastosowany detektor radził sobie z takimi problemami. Wykrywanie figur geometrycznych na obrazie poprzez kształt może być zrealizowane na kilka sposobów. Te ważniejsze dla pracy zostały przedstawione poniżej.

#### Wykrywanie krawędzi

Wykrywanie krawędzi jest popularną metodą uwidaczniania obiektów na obrazie. W poprzednim rozdziale opisywano wykrycie krawędzi na potrzeby łączenia obrazów w panoramę. Wspomniano, że powszechnym rozwiązaniem jest detektor Canny lecz istnieją również inne metody wykrywania krawędzi. Przy wykrywaniu krawędzi należy zaznaczyć, że krawędź identyfikowana jest jako przejście z obszaru ciemniejszego do jaśniejszego bądź na odwrót. Można stwierdzić, że jest to granica pomiędzy dwoma obszarami o różnych jasnościach. Takie podejście wymaga ustalenia progu zmiany jasności jaki powoduje wykrycie krawędzi. Część metod bazuje na operatorach gradientowych ustalając lokalny, zamiast globalnego próg wykrywania krawędzi. Metody te wykorzystują zmiany pierwszej lub drugiej pochodnej obrazu w skali szarości. Przykładem metody wykrywania krawędzi odmiennej od Canny jest Operator Robertsa czy Operatora Sobela sprawdzający różnicę miedzy sąsiednimi pikselami w obrazie przez splot macierzy z obrazem. Takie algorytmy zostały uwzględnione np. w pracy [15].

#### Detektor Canny

Jak wcześniej zostało wspomniane jedną z popularniejszych metod wykrywania krawędzi jest metoda Canny zaprezentowana w Johna F. Canny w 1986. Metoda przedstawia się następująco. Pierw następuje filtracja obrazu za pomocą filtru Gaussa. Powoduje to wstępnie odfiltrowanie zakłóceń. Następnie za pomocą np. operatora Sobela wykrywa się gradient zmian poziomych i pionowych każdego punktu na obrazie. W kolejnym kroku wyznacza się długość i kąt detekcji krawędzi . Niekiedy kąt zaokrągla się do wartości liczonych co 45˚. Następnie odrzuca wykryte piksele, które nie łączą się z żadną pobliską krawędzią i dołącza piksele na zakończeniach wykrytych krawędzi jeżeli próg wykrywania je odrzucił. Detektor Canny dzięki swoim właściwością doskonale nadaje się do uwidaczniania kształtów obiektów. Następnie na takim obrazie należy odszukać takie obiekty, które nas interesują. Dla problemu TSR są to: trójkąty, kwadraty i okręgi.

#### Wykrywanie rogów

Wykrywanie rogów obiektów może być przydatne zwłaszcza dla znaków ostrzegawczych i informacyjnych. Jeżeli nastąpi wykrycie rogów w konkretnej konfiguracji adekwatnej dla znaku można domniemywać, że w tym miejscu pokazany jest znak. Warto również wspomnieć, że narożniki wykryte np. detektorem Harrisa w poprzednim etapie mogą posłużyć do wykrywania obiektów w obecnym.

#### Transformata Hougha

Algorytmem na który należało by zwrócić uwagę jest filtr Hougha, który pozwala odnajdywać regularne kształty. Została ona zaprezentowana w 1962 roku jako metoda wykrywania linii prostych ale udało się ją zastosować również dla wykrywania regularnych kształtów takich jak okręgi, kwadraty czy trójkąty [16]. W 1993 roku Anagnou przestawił udoskonaloną metodę pozwalającą uzyskanie większej rozdzielczości kątowej oraz radialnej znajdowanej linii. Omówienie metody zostało zrealizowane na przykładzie wykrywania kształtu kwadratowego. W tej metodzie każda prosta opisana jest równaniem . Początkowo zostaje zaimplementowana tablica (komórki nazywa się akumulatorami) z wartościami zerowymi. Następnie każdy punkt obrazu przekształcany jest w dyskretną krzywą sinusoidalną w przestrzeni Oρϴ. Oblicza się wartości dla ϴ=(0,360˚). Obliczenie wartości ρ uzyskuje się przez dodanie jedynek w odpowiednie pola tablicy. Po wykonaniu inkrementacji dla wszystkich punktów komórki z największą wartością ρ. Położenie komórki określają parametry prostej zaś wielkość ρ określa długość odcinka. Jeżeli wykryte proste mają podobną długość i przecinają się pod kontem prostym to można uznać, że kształt jest kwadratowy. Transformacja Hougha odnosi sukcesy w wykrywaniu linii czy okręgów lecz do wykrycia innych kształtów jak np. trójkąty wymaga skomplikowanych obliczeń i jest obciążająca pamięciowo.

### Wykrywanie na podstawie tekstury

Wykrywanie obiektów na podstawie koloru i kształtu nie zawsze daje dobre wyniki, zaczęto szukać innych rozwiązań mogących poprawić skuteczność wykrywania. W roli wyjasnienia tekstura to graficzny odpowiednik faktury. Faktura obiektów w rzeczywistości bardzo wpływa na postrzeganie obiektów przez człowieka dlatego naukowcy zaczęli zgłębiać zagadnienie dla rozpoznawania obiektów. Kilka metod wykrywania obiektów na podstawie tekstury zostało przedstawione poniżej.

#### HOG

HOG (ang. Histograms of Oriented Gradients) - histogram gradientów zorientowanych jest deskryptorem obrazu pozwalającym na znalezienie kształtu i wyłonienie obiektu [17]. Idea algorytmu polega na podzieleniu obrazu przekonwertowanego do skali szarości na małe fragmenty (np.8x8 px.) i obliczeniu dla każdego piksela w fragmencie różnicy jasności pomiędzy pikselami sąsiadującymi (gradientu). Następnie dla każdego z fragmentu wyznacza się histogram gradientu. W przeciwieństwie do wcześniej przedstawionego algorytmu SIFT, HOG oblicza deskryptory w równomiernie określonych fragmentach obrazu. Zastosowanie lokalnej normalizacji kontrastu w nakładających się na siebie regionach poprawia skuteczność wykrywania obiektów. Zaproponowany w pracy [18] wariant HOG (HOGv) posiada dwie modyfikacje poprawiające wykrywanie obiektów. Pierwszą z nich jest uwzględnienie zarówno wrażliwych jak i niewrażliwych na kontrast orientacji gradientów, w taki sposób, że bardziej szczegółowe lokalne informacje o znakach mogą być włączone do zgromadzonych histogramów. Drugą modyfikacją jest to, że każdą komórkę normalizuje się odpowiednio z czterema sąsiednimi blokami. Znormalizowane histogramy komórki są wymiarowo zmniejszane za pomocą strategii podstawowej analizy komponentów (PCA). Takie działanie ma na celu usunięcie nadmiarowych informacji.

#### LBP

LPB (ang. local binary patterns) zostało opisane w 1994 roku [19] jako algorytm do wykrywania obiektów. Idea algorytmu jest podobna do algorytmu HOG. Jak poprzednio ramka obrazu zostaje podzielona na mniejsze obszary. Różnica jest to, że zamiast tworzyć histogram w każdym obszarze piksele porównuje się w ustalonej kolejności z pikselami sąsiadującymi. W zależności czy wartość piksela jest większa lub równa czy mniejsza w osobnej tablicy dla każdego piksela wpisuje się odpowiednio 1 lub 0. Dzięki takiemu rozwiązaniu gdy zostaje zmieniona globalna jasność obrazu, skuteczność algorytmu nie spada. W każdej fragmencie z wyznaczonych wartości tworzy się histogram. Wartości na osi x przedstawione są co 45˚. Następnie histogram zostaje unormowany i zostaje ustalony gradient całego okna. Po stworzeniu gradientów w każdym oknie następuje połączenie podobnych gradientów ze sobą i próba rozpoznania obiektu. Jeżeli wykryte gradienty są podobne do tych, które posiada obiekt jaki chciano wykryć algorytm uznaje, że obiekt został wykryty. Algorytm odniósł duży sukces w wykrywaniu twarzy dlatego postarano się go użyć do wykrywania innych obiektów. Ponieważ algorytm do swojego działania wykorzystuje dużą ilość obliczeń można wprowadzić obszar zainteresowań ROI, który zawęża strefę obiektu. Takie podejście zaproponowano w pracy [20]. Rozwiązanie polega na ustaleniu potencjalnych obszarów poszukiwań za pomocą okna przesuwanego o niewielkich rozmiarach. Etap nazywa się filtrowaniem zgrubnym i używa algorytmu LDA. Następnie podczas dokładnego filtrowania weryfikuje się okna odnalezione w etapie poprzednim oraz za pomocą metody NMS (ang.  non-maximal suppression) wykonywane jest filtrowanie okien mogących odnosić się do tego samego obszaru. Klasyfikacja obiektu wykonywana jest za pomocą maszyny wektorów nośnych, która została opisana w następnym rozdziale.

### Podejście hybrydowe

Podejście hybrydowe polega na połączeniu metod opartych na kolorze, kształcie i fakturze. Zazwyczaj w początkowym etapie następuje progowanie w określonych kolorach co zawęża obszar poszukiwań. Następnie w odnalezionych regionach wykorzystuje się podejścia oparte na kształcie i fakturze w celu poprawy wydajności wykrywania. Przykładem metody hybrydowej segmentacji jest metoda zaproponowana w artykule [14]. Wpierw dzięki wykrywaniu krawędzi uwidacznia się kształty obiektów podobnych do znaków a następnie filtruje się takie obiekty metoda opartą na kolorach. Dodatkowo autorzy wprowadzili swój własny filtr SVF (ang. Simple Vector Filter ) działający w przestrzeni HSI, który pomaga lepiej rozróżnić kolory obiektów trakcie ruchu.

#### SVM

Maszyna wektorów nośnych SVM (ang. Support Vector Machine) jest klasyfikatorem umożliwiającym określenie do jakiego zbioru należy obiekt. Maszyna do poprawnego działania potrzebuje zbioru uczącego, w którym przedstawione są poprawnie sklasyfikowane obiekty. SVM znajduje hiperpłaszczyzne (funkcje) oddzielającą dwie klasy. Jeżeli taka funkcja nie istnieje w przestrzeni zadania należy wprowadzić funkcję jądra, która powiększy przestrzeń. System, który korzysta z maszyny wektorów nośnych dla problemu TSR został przedstawiony w pracy [21]. Działanie systemu polega na wykrywaniu obszary występowania znaków za pomocą progowania w przestrzeni HSI. Znaki białe wykrywane są za pomocą rozkładu achromatycznego. Każdy obszar prawdopodobnego wystąpienia znaku wpisywany jest w kwadrat. Następnie wyznacza się 20 odległości liczonych od ramki kwadratu do znalezionego koloru w środku ramki mający być obwiednią obiektu. Z tych 20 odległości tworzy się wektor DtB dostarczany jest na wejście SVM. Warto wspomnieć, że wyznaczony w ten sposób wektor znaków ośmiokątnych niezbyt różni się od znaków okrągłych dlatego znaki ośmiokątne klasyfikowane są dopiero na etapie rozpoznawania znaku. Następnie przy użyciu kilku wytrenowanych maszyn SVM następuje klasyfikacja obszaru. Każda maszyna potrafi rozpoznać jeden typ obrazu. W zależności od wykrytego koloru (czerwonego, niebieskiego, żółtego lub białego) algorytm wyznacza inne maszyny do klasyfikacji. Proces rozpoznania opiera się na maszynie SVN z ziarnami Gaussa. Dużą zaletą metody jest jej odporność na rotację.

#### HOG i SVM

Maszyna wektorów nośnych może być również połączona z algorytmem tworzącym histogram gradientów zorientowanych. Takie podejście zaprezentowane zostało w pracy [13]. W pracy wykrywanie obiektów za pomocą metody HOG wspomagane jest informacją o kolorze, co jest ogromnie istotne dla wykrywania znaków drogowych. Oryginalnie algorytm HOG oblicza gradienty dla każdego kanału kolorów i przyjmuje gradient o największej normie, zaś algorytm w opisywanej pracy [13] oblicza funkcje HOG dla każdego kanału kolorów po czym łączy je ze sobą tworząc histogram. W odróżnieniu od podobnych metod, obliczenie funkcji HOG następuje na podstawie mapy prawdopodobieństwa, ponieważ mapa prawdopodobieństwa może kodować informacje o kolorze i kształcie znaku drogowego, jednocześnie tłumiąc wpływ tła. Jednak na podstawie samej mapy prawdopodobieństwa nie ma możliwości zidentyfikowania znaku. Aby rozwiązać ten problem, dodano dodatkową funkcję w postaci klasycznego algorytmu HOG. Do identyfikacji przeszkolony został wielopoziomowy klasyfikator SVM. Autorzy algorytmu przetestowali swoją pracę na zbiorze danych GTSDB, gdzie istnieją trzy kategorie znaków drogowych, dlatego wyszkolony został 4-klasowy klasyfikator SVM z dodatkową klasą tła. Za jądro klasyfikatora SVM została wybrana funkcja radialna, ponieważ najlepiej sprawdziła się w eksperymentach. Zaproponowany algorytm na bazie danych GTSDB wykrywa znaki zakazu i nakazu z 100 % poprawnością, znaki ostrzegawcze z 94.29 % poprawnością. Czas wykrycia znaków w ramce to 0,067 sekundy co jest bardzo zadowalającym wynikiem.

### Inne podejścia

#### Algorytm Violi i Jonesa

Algorytm Viola–Jones zaproponowany w 2001 przez Paul Viola i Michael Jones wprawdzie został stworzony do wykrywania twarzy [22], lecz znakomicie nadaje się do wykrywania obiektów każdego typu na obrazie. Takie podejście zostało przedstawione w pracy [2]. W pracy jako klasyfikatora używa się algorytmu AdaBoost (ang. Adaptive Boosting). Algorytm AdaBoost jest oparty na boostingu. Tworzy on z kilku mniejszych klasyfikatorów jeden silny klasyfikator. Dla ww. pracy jako słabe klasyfikatory przyjmuje się drzewa decyzyjne, w których każdy węzeł jest jedną z cech haaro-podobnych. Cechy Haara swoją nazwę zawdzięczają falką Haara zaproponowanym przez Alfréda Haara w 1909 lub 1910 roku. Cechy Haara to najprościej mówiąc jest to pewna maska, która posiada dwa typy pikseli. Po jej nałożeniu na część obrazu sumuje się jasności pikseli należących do danego typu. Jeżeli różnica między dwoma typami jest wystarczająca cecha Haara daje pozytywną odpowiedź. Algorytm używa niewielkiej ramki przesuwanej po obrazie. W każdym położeniu ramki za pomocą cech Haara stara się odnaleźć miejsce występowania znaku. Cechy Haara sprawdzane są kaskadowo co pozwala od razu odrzucić rejony gdzie znak nie występuje. By przyspieszyć obraz zostaje scałkowany. W wcześniej już wspomnianej pracy [2] metoda pozwoliła na wykrywanie nie tylko znaków drogowych lecz również na wykrycie samochodów a nawet rowerzystów. Ponieważ algorytm oprócz wykrywania znaków wykrywa dwa inne typy obiektów, wprowadzono dodatkowo funkcje subkategoryzacji. Wielką zaletą metody jest wykrywanie obiektów w czasie rzeczywistym. Praca, która korzysta z metody opartej na AdaBoost i cechach Haara została zaprezentowana w [23]. Dzieło pozwala na wykrywanie i śledzenie obiektów. Cechy Haara zostały również wsparte informacją o kolorach co pozwoliło na redukcję błędów pierwszej klasy z 1.6 % do 1.4 %, oraz błędów drugiej klasy z 0.3 % do 0.03 %, co jest spektakularnym wynikiem. Praca [10] pozwala na śledzenie obiektów i również wykorzystuje kaskadę AdaBoost. Co ciekawe algorytm przedstawiony w pracy jest w stanie sam się doszkalać przez zbieranie pozytywnych i negatywnych próbek. Algorytm do doszkalania wykorzystuje śledzenie wsteczne. Oczywistością jest, że znaki które są bliżej są również lepiej rozróżnialne, dlatego po wykryciu znaku algorytm sprawdza poprzednie klatki filmu w poszukiwaniu wykrytego znaku w mniejszej skali i stara się samoczynnie doszkolić.

#### Mapa cieplna

Wartym wspomnienia podejściem detekcji znaków jest tworzenie mapy cieplnej obszarów występowania znaków. Taka mapa działa na zasadzie algorytmów biologicznych. Autorzy artykułu [24] stworzyli algorytm pozwalający lokalizować miejsca występowania znaków drogowych na podstawie mapy cieplnej. Praca nie została szczegółowo opisana dlatego zainteresowanego czytelnika odsyła się do pracy źródłowej. S

#### Symetria promieniowa

Niektóre ostatnie prace [25] i [26] wdrożyły szybki algorytm oparty na symetrii promieniowej, która dostosowany do kształtów trójkątnych, kwadratowych, diamentowych, ośmiokątnych i okrągłych. Algorytm uwzględnia gradient obrazu dostarczonego skali szarości i wykorzystuje naturę kształtów, które głosują w punkcie środkowym dla okrągłych znaków i linii głosów w przypadku regularnych wielokątów. Główną zaletą tej metody jest to, że jest ona w stanie działać w czasie rzeczywistym. Ponieważ wykrywa kształty oparte na krawędziach, algorytm jest odporny na zmiany oświetlenia.

### Podsumowanie

Podsumowując zagadnienie wykrywania znaków drogowych na obrazie należy stwierdzić, że na dzień dzisiejszy podejścia oparte na samym kolorze wyszły z użycia i najpowszechniejsze są algorytmy hybrydowe. Duża część algorytmów korzysta z połączenia podejść opartych na kolorze i kształcie bądź kolorze i teksturze. Podejścia oparte na teksturze (HOG, LPB, ACF) z dużą dokładnością potrafią wyłonić obrys znaku drogowego, co na etapie identyfikowania może posłużyć do szkolenia klasyfikatora. Niestety takie przetwarzanie na całym obrazie jest zbyt kosztowne obliczeniowo, dlatego zawęża się obszar stosując ROI. Pozwala to przyspieszyć obliczenia i umożliwia przetwarzanie obrazu w czasie rzeczywistym. Obszar ROI dotyczy głównie miejsc środkowych i po prawej stronie. By lepiej wyznaczyć położenie ROI można zastosować progowanie w określonym kolorze, najczęściej w czerwonym. Niektóre algorytmy jak ten zaproponowany w pracy [27] używają funkcji ACF z klasyfikatorem AdaBoost. Algorytm ACF został również użyty w pracy [28] w połączeniu z informacją o kolorach i gradientach oraz algorytmem HOG i uzyskał dobre wyniki. Oprócz powyższych podejść, splotowa sieć neuronowa (CNN) jest stosowana do wykrywania znaków drogowych i osiąga doskonałe wyniki [11]. Warto również wspomnieć, że dla lepszej wstępnej filtracji obrazu można zastosować również Filtry Gabora lecz obecnie używanie takiego algorytmu jest nieefektywne ze względu na korzyści i czas obliczeń.

## Klasyfikacja znaków drogowych

Klasyfikowanie znaków, wyłączając etap śledzenia, jest ostatnim etapem wykrywania znaków drogowych. Omawiana poprzednio segmentacja zawęża się obszar występowania znaku co w rezultacie prowadzi do faktu, że znak na potrzeby klasyfikacji zajmuje około 70 % obrazu wejściowego. Zadaniem klasyfikacji jest odróżnienie czy w miejscu wskazanym przez segmentacje znak rzeczywiście istnieje i jeżeli tak jest odczytanie znaku. Obecnie najpowszechniej stosowanym klasyfikatorem obrazów są sieci neuronowe. Już w artykule z 1996 roku [15] zostały użyte sieci neuronowe do wykrycia typu znaku drogowego. W tej części zostały opisane metody klasyfikacji na potrzeby systemu TSR. Warto jednak wspomnieć, że prócz sieci istnieją inne metody rozpoznawania typu znaku tj. algorytmy genetyczne, które również zostały przedstawione poniżej.

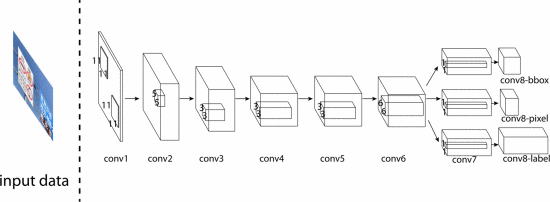
### Sztuczne sieci neuronowe

Sztuczne sieci neuronowe są zaprogramowanymi strukturami, które symulują model zdolny do wykonywania obliczeń matematycznych. Idea sztucznych sieci neuronowych inspirowana była budową ludzkich neuronów. Każda sieć zbudowana jest z warstw węzłów zwanych neuronami. Węzły połączone są ze sobą synapsami. Zazwyczaj do jednego węzła wchodzi wiele synaps. Każda synapsa posiada swoją wagę, a węzeł funkcję aktywacji. Gdy na wejściu synapsy pojawia się sygnał mnożony on jest przez wagę synapsy i podawany na węzeł. Gdy łączna wartość sygnału podanego na węzeł jest wystarczająca sygnał podawany jest dalej na kolejną warstwę. Sieci neuronowe stosowane są do wszelakich zadań lecz na potrzeby pracy zostanie przedstawione zastosowanie w rozpoznawaniu obrazów. W takim zastosowaniu na wejściu sieci podawane są piksele obrazu, który należy rozpoznać. Zazwyczaj sieć ma określoną liczbę pikseli wejściowych, dlatego wykryty obszar przez segmentację należy przeskalować i znormalizować do tej liczby. Do normalizacji obrazu można stosować wiele metod. Najprostszą z nich jest odrzucenie co pikseli, co konkretną wartość liczbową . Rozwiązaniem dzięki któremu traci się mniejszą ilość informacji lecz jest bardziej kosztowny obliczeniowo jest interpolacja dwuliniowa. Istnieje ogromna liczba typów sieci neuronowych i metod usprawniających ich działanie. Sieć składająca się z więcej niż jedna warstwa ukryta nazywana jest siecią wielowarstwową. Przykładem takiej sieci jest perceptron wielowarstwowy.

#### MLP

MLP (ang. Multilayer perceptron) - perceptron wielowarstwowy jest najpopularniejszy rodzajem sieci neuronowych. Taka sieć składa się z jednej warstwy wejściowej i kilku warstw ukrytych. Na potrzeby klasyfikacji w węzłach sieci MLP znajduje się funkcja nielinowa. Typem sieci MLP służącym do rozpoznawania obrazów jest splotowa sieć neuronowa inaczej znana jako sieć konwolucyjna. Tego typu sieć została przedstawiona w wcześniej wspomnianej pracy [15]. Autorzy użyli dwóch sieci typu MLP. Jednej dla znaków trójkątnych, a drugiej dla okrągłych. Wielkość wejścia sieci odpowiadała obrazowi o rozmiarach 30x30 piksel. Warstwa wyjściowa sieci posiadała 10 wyjść z czego 9 wyjść odpowiadało znakom. Ostatnie wyjście informowało, że znak nie został rozpoznany. Autorzy eksperymentalnie dobrali wielkość sieci z pośród 3 typów sieci. Najlepsze wyniki uzyskała 3 konfiguracja 30x30/15/5/10 z 98% skutecznością dla najlepiej rozpoznawalnych znaków. Rozpoznawanie na jednostce obliczeniowej PC486 33 MHz zajmuje 220 ms dla obrazu w rozdzielczości 256x256 co jest znakomitym wynikiem jak na rok 1996. Należy jednak zaznaczyć, że segmentacja w tej pracy była bardzo kosztowna czasowo, co nie pozwoliło algorytmowi działać w czasie rzeczywistym.

W innej pracy przedstawionej w 2003 roku [29] również użyto splotowych sieci neuronowych do rozpoznawania znaków drogowych. W tej pracy segmentacja obszaru występowania znaku przeprowadzona była za pomocą progowania oraz algorytmów genetycznych. Sieć była uczona za pomocą algorytmu wstecznej propagacji błędu (ang. Backpropagation Neural Network), według paradygmatu ART1 (ang. Adaptive Resonance Theory). Sieć posiada dwie warstwy ukryte. Dla całego algorytmu przedstawionego w pracy rozpoznanie obrazu wraz z klasyfikacją znaków zajmuje mniej niż 8.8 ms na procesorze AMD Duron 1 GHz. Biorąc jednak pod uwagę, że dla systemów TSR rozpoznanie w czasie rzeczywistym liczone jest od prędkości 0.2 s dla jednego obrazu wynik pracy jest bardzo dobry. W pracy [30] opracowano algorytm bazujący na sieci neuronowe propagacji wstecznej pozwalający na śledzenie obiektów. Na potrzeby algorytmu stworzono dwie sieci działające równolegle ze sobą. Jedna z nich stara się zidentyfikować obiekt na bazie koloru, a druga na bazie wykrytych krawędzi. Obiekt jest rozpoznawany i klasyfikowany a następnie śledzony. Czas rozpoznania obrazu wynosi 0.3 s. Sieć neuronowa uczona algorytmem wstecznej propagacji została również zaimplementowana w 2005 r. przez autorów artykułu[31]. Autorzy wspomnieli, że proces uczenia sieci algorytmem wstecznej propagacji jest kosztowny pod względem obliczeniowym oraz łatwo podczas szkolenia sieci wpaść w lokalne minimum co przysparza problemów. By zapobiec ostatniemu problemowi część autorów algorytmów starała się uczyć sieć metodami głębokiego uczenia DL (ang. Deep Learning). Warto zauważyć, że przy uczeniu sieci jakąkolwiek metodą ważne jest by niektóre obrazy uczące były w pewien sposób zaszumione oraz obrócone pod małym kontem. Taki zabieg powoduje większą odporność sieci. W pracy [32] szkolono dwie sieci wielowarstwowe metodą głębokiego uczenia. Jedna sieć była przeznaczona do segmentacji obrazów, a druga do klasyfikacji. Obie sieci posiadały podobną strukturę z wyjątkiem ostatniej warstwy. Przy testowaniu sieci przeznaczonej do segmentacji obrazu zauważono, że sieci splotowe są znacznie wydajniejsze gdy zostają użyte w trybie przesuwanego okna. Poza tym część informacji z nakładających się regionów można użyć wielokrotnie co przyspiesza algorytm. Architektura sieci przedstawiona jest na Rysunek 3. Architektura sieci splotowej z rozgałęzieniem po 6 warstwie



Rysunek Architektura sieci splotowej z rozgałęzieniem po 6 warstwie

Przy szkoleniu sieci niektóre próbki szkoleniowe były zniekształcone o ± 20˚, oraz dodano obrazy nie zawierające znaków drogowych. Łączenie użyto około 6600 obrazów do szkolenia i 3400 do testowania sieci. Do testów została użyta jednostka Intel Xeon E5-1620, dwoma kartami NVIDIA Tesla K20 G-PU i 32 GB pamięci. Sieć wykrywa znaki drogowe w ciągu 0.8 s z 88 % skutecznością.

#### CNN

CNN (ang. Convolutional Neural Network) są to splotowe sieci neuronowe, których pierwsze warstwy dokonują pewnego łączenia danych wejściowych. Takie działanie ma na celu zapobiec problemowi przeuczenia się sieci w etapie uczenia. W przypadku przetwarzania obrazów splot może polegać na łączeniu informacji z kilku pikseli i przekazywaniu jej jako ujednolicona wartość. W pracy [13] zastosowano splotową sieć neuronową dla klasyfikacji znaku drogowego. W tym celu wyszkolono trzy sieci różnym typom znaków. Na wejście sieci dostarczono obrazy w skali szarości o rozmiarze 32×32 pikseli. Ponieważ obrazy są przechwytywane w różnych warunkach oświetleniowych i pogodowych, znaki tej samej klasy mogą znacząco różnić się od siebie. Aby zmniejszyć różnicę jasności użyto metody korelacji adaptacyjnego histogramu ograniczonego kontrastem (CLAHE ), pozwalającej dostosować kontrast obrazów. Z powodu tego, że wykryte regiony mogą zawierać błędy pierwszego i drugiego rodzaju dodano dodatkową klasę tła w trakcie uczenia. Każda z sieci zawierała dwie warstwy splotowe i dwie warstwy posiadające architekturę sieci MLP. Rozmiar obrazu wejściowego wynosi 32×32. Rozmiar filtru w obu warstwach splotowych wynosił 5×5. Po pierwszej warstwie splotu, zostało dodanych się 16 map powodując zmniejszenie rozmiaru wejścia drugiej warstwy splotowej najpierw do rozdzielczości 28×28, a następnie do 14×14. Algorytm po transformacjach obrazu i zmapowaniu dostarcza wektor o długości 800 znaków. Sieć jest zaprogramowana w języku C++ z wykorzystaniem biblioteki OPENMP. Wykorzystywane są również implementacje MSER, HOG i SVM z biblioteki OpenCV. Sieć neuronową wyszkolono za pomocą Torch7 i przepisano wyszkolone wartości do kodu C++. Algorytm został uruchomiony na komputerze z czterordzeniowym procesorem 3,7 GHz.

Autorzy artykułu [11]. zaproponowali pewne ulepszenie dla sieci. Sieć posiada 6 warstw ukrytych. Ulepszenie polega na dodaniu klasyfikatora po pierwszej warstwie splotowej. Oczywiście sieć również przekazuje pełną informację do warstwy trzeciej. Takie rozwiązanie spowodowało, że metoda na zbiorze danych GBTSR osiągnęło dokładność wykrywania na poziomie 99,7 % co jest jednym z lepszych wyników.

W pracy[33] zauważyli, że sieci splotowe są wydajniejsze, gdy są używane w przesuwanym oknie, ponieważ wiele obliczeń może być ponownie wykorzystanych w nakładających się regionach.

Splotowe sieci neuronowe użyte były również w pracach,

#### ELM

ELM (ang. Extreme Learning Machine) jest algorytmem uczenia się pojedynczych sieci ukrytych sieci neuronowej (SFNN). Pierwszą zaletą algorytmu ELM jest to, że wartości wejściowe między wejściem i warstwami ukrytymi są losowo przypisywane, co pozwala losowe mapowanie cech. Ponieważ wyszkolone są tylko warstwy wyjściowe między warstwami ukrytymi i wyjściowymi, nie jest wymagane strojenie za pomocą wstecznej propagacji warstwa po warstwie. Algorytm ELM może uzyskać optymalne i uogólnione rozwiązanie do rozpoznawania wieloklasowego. Dodatkowo, łatwo można rozszerzyć ELM na sieć wielowarstwową lub głęboką za pomocą techniki autoencoder. Metoda ELM została również wykorzystana do modelowania lokalnych pól recepcyjnych i wykorzystywana do uczenia na dużych zbiorach danych . W związku z tym zastosowanie ELM dla TSR może dać lepsze rozwiązanie. Co więcej, z powodu losowego przypisania wag wejściowych, algorytm ELM może zmniejszyć koszt obliczeniowy szkolenia. Ponieważ istnieje tylko jedna ukryta warstwa, szybkość obliczeniowa procesu rozpoznawania jest również szybka.

Praca [18] stosuje jako klasyfikator pojedynczą sieć z ukrytą warstwą. W oparciu o algorytm ELM, połączenie pomiędzy warstwami wejściową i ukrytą realizuje mapowanie cech losowych, podczas gdy tylko wagi pomiędzy warstwami ukrytymi i wyjściowymi są wyszkolone. W rezultacie strojenie warstwa po warstwie nie jest wymagane. Tymczasem norma wag wyjściowych jest zawarta w funkcji kosztów. W związku z tym, Klasyfikator oparty na ELM może osiągnąć optymalne i uogólnione rozwiązanie dla wieloklatkowych TSR. Ponadto może zrównoważyć dokładność rozpoznawania i koszty obliczeniowe.

#### LDA

LDA (ang. Linear Discriminant Analysis) - liniowa analiza dyskryminacyjna jest to algorytm, którego używa się w uczeniu maszynowym do znalezienia liniowej kombinacji cech, które najlepiej rozróżniają dwie lub więcej klas obiektów lub zdarzeń. Wynikowe kombinacje są używane jako klasyfikator liniowy lub, częściej, służą redukcji wymiarów do późniejszej klasyfikacji statystycznej. [here] (usunąć cały opis??)

### SVM

Część systemów TSR do klasyfikacji znaków drogowych korzysta z maszyny wektorów nośnych SVM (z ang. support vector machine). Przykładem takiego systemu jest wcześniej omawiany system z 2013 roku przedstawiony w pracy [20]. W przypadku pracy autorzy wyuczyli algorytm bazujący na maszynie wektorów do klasyfikacji znaków ostrzegawczych i informacyjnych. W przypadku tej pracy algorytm był szkolony za pomocą 600 różnych danych testowych pochodzących z zbioru GTSBD oraz testowany na 300 innych obrazach. Osiągnął dobre wyniki wykrywania niestety nie pozwalające pracować w czasie rzeczywistym. Implementacja została wykonana za pomocą programy Matlab i na jednostce Core 13 3.3 GHz. Możliwe, że po implementacji w języku C/C++ i na bardziej wydajnym procesorze szybkość wzrosła by na tyle, że można by było uznać że algorytm pracuje w czasie rzeczywistym.

We wcześniej już wspomnianej pracy [21] również używa się maszyny wektorów nośnych do rozpoznania obiektów. Rozpoznawanie realizowane jest przez maszyny SVM z jądrami Gaussa. Praca do treningu wykorzystuje bibliotekę LIBSVMS. Starano się użyć funkcji liniowej jako hiperpłaszczyzny lecz nie zawsze było to możliwe. W trudnych przypadkach wprowadzono jądro Gaussa. Na wejście SVM podawano 31x31 pikseli dlatego każdy obszar gdzie zostały wykryte potencjalne znaki musiał być przeskalowany do tej rozdzielczości. Dla każdego koloru i kształtu podano od 20 do 100 próbek uczących. Autorzy algorytmu przekonują, że ich dzieło wykryło wszystkie znaki podczas jazdy z normalną prędkością zarówno w dzień jak i w nocy. Trzeba jednak wspomnieć, że podczas testu warunki pogodowe były idealne, a znaki nie były w żaden sposób zniekształcone.

### GA

Drugim najbardziej popularnym podejściem po sieciach neuronowych do klasyfikacji są algorytmy genetyczne GA (ang. Genetic Algorithm). [here] (krótki opis). Jedna wcześniej opisywanych prac wykorzystująca taki algorytm została przedstawiona w artykule [14]. Segmentacja w tej pracy odbywa się za pomocą wykrywania krawędzi i algorytmu SVF. W opisywanej pracy algorytm jest modyfikacją Algorytmu Genetycznego nazwanego Step-GA. Modyfikacja polega na testowaniu nowych pokoleń w kolejnych klatkach obrazu. Z algorytmu genetycznego również korzysta praca [29], która została przedstawiona wcześniej. Warto wspomnieć też o pracy [1], która swoją premierę miała w roku 1996 i przedstawia podejście które łączy algorytm genetyczny i sieć neuronową.

### K-d Tree

Drzewo wielowymiarowe Kd (ang. k-dimensional tree) jest drzewem binarnym. W pracy [34] użyto drzewa binarnego do wykrywania obiektów na obrazach poddanych transformacie HOG. Wykazało porównywalną wydajność z innymi najnowocześniejszymi metodami w zakresie szybkości obliczeniowej procesu rozpoznawania, ale jego dokładność rozpoznawania rośnie wraz z kosztem obliczeniowym, dlatego nie nadają się tak dobrze do zagadnienia TSR.

### Template matching

Template matching jest klasyczną metodą dopasowania dwóch obrazów do siebie. Metoda pozwana na znajdowanie na obrazie jego wycinka (wzorca). Taki algorytm jako obraz główny przyjmuje jeden z obrazów, a następnie jako wzorzec przyjmuje się wycinek z obrazu drugiego. Dla poprawienia działania przyjmuje się kilka wycinków obrazów. Ponieważ została wyznaczona lokalizacja wzorca na obrazie głównym oraz znane jest położenie wyciętego elementu na drugim obrazie można statystycznie dopasować obrazy. Najpopularniejszą używaną miarą dopasowania jest suma kwadratów błędów. Metoda template matching została przedstawiona np. w pracy [35]. Metoda jednak posiada dużą złożoność obliczeniową oraz jest słabo odporna na rotację i szumy. Do metod klasycznych można zaliczyć również metody bazujące na informacji wzajemnej.

### Podsumowanie

Najpowszechniej stosowanym podejściem do identyfikacji obiektów są splotowe sieci neuronowe. Algorytmy genetyczne zajmują drugie miejsce w powszechnym stosowaniu i mogą być użyte zarówno na etapie klasyfikacji jak i segmentacji. Drzewa wielowymiarowe nie nadają się do rozpoznawania znaków ponieważ są zbyt wolne. Niektórzy autorzy starają się przyspieszyć wykrywanie znaków drogowych łącząc SVM z CNN [13].

# Program

# Propozycja rozwinięcia/konstrukcji metody

# Przygotowanie środowiska badawczego i plan badań

# Podsumowanie

# Bibliografia

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | Y. Aoyagi i T. Asakura, „A study on traffic sign recognition in scene image using genetic algorithms and neural networks,” w *International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, Taipei, Taiwan, Taiwan, 9 sierpień 1996. |
| [2] | Q. Hu, S. Paisitkriangkrai, C. Shen, A. v. d. Hengel i F. Porikli, „Fast Detection of Multiple Objects in Traffic Scenes With a Common Detection Framework,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* tom 17, nr 7, pp. 1002-1024, kwieceń 2016. |
| [3] | A. Mogelmose, M. M. Trivedi i T. B. Moeslund, „Vision-Based Traffic Sign Detection and Analysis for Intelligent Driver Assistance Systems: Perspectives and Survey,” *Transactions on Intelligent Transportation Systems,* tom 13, nr 4, pp. 1484-1497, grudzień 2012. |
| [4] | B. Zitová i J. Flusser, „Image registration methods, a survey. Image and Vision Computing,” *Image and Vision Computing,* tom 21, nr 11, p. 977–1000, październik 2003. |
| [5] | F. Maes, A. Collignon, D. Vandermeulen, G. Marchal i P. Suetens, „Multimodality image registration by maximization of mutual information,” *Transactions on Medical Imaging,* tom 16, nr 2, p. 187–198, kwiecień 1997. |
| [6] | M. Kondej, B. Putz i M. Bartyś, „Szybki algorytm dopasowania obrazów dla potrzeb fuzji w czasie rzeczywistym,” 25 listopad 2010. [Online]. Available: https://automatykaonline.pl/Artykuly/Sterowanie/szybki-algorytm-dopasowania-obrazow-dla-potrzeb-fuzji-w-czasie-rzeczywistym. [Data uzyskania dostępu: 11 03 2019]. |
| [7] | J. Heather i M. Smith, „New adaptive algorithms for real-time registration and fusion of multimodal imagery,” 5 maj 2010. [Online]. Available: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7689/768908/New-adaptive-algorithms-for-real-time-registration-and-fusion-of/10.1117/12.850029.short?SSO=1. [Data uzyskania dostępu: 15 marzec 2019]. |
| [8] | D. G. Lowe, „Object Recognition from Local Scale-Invariant Features,” University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada, 1999. |
| [9] | E. Lee, S.-S. Lee, Y. Hwang i S.-J. Jang, „Hardware implementation of fast traffic sign recognition for intelligent vehicle system,” w *2016 International SoC Design Conference (ISOCC)*, Jeju, South Korea, 23-26 październik 2016. |
| [10] | D. Deguchi, M. Shirasuna, K. Doman, I. Ide i H. Murase, „Intelligent traffic sign detector: Adaptive learning based on online gathering of training samples,” w *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden, Germany, 05 lipiec 2011. |
| [11] | P. Sermanet i Y. LeCun, „Traffic sign recognition with multi-scale Convolutional Networks,” w *The 2011 International Joint Conference on Neural Networks*, San Jose, CA, USA, 21 lipiec 2011. |
| [12] | Y. Freund i R. E. Schapire, „Experiments with a New Boosting Algorithm,” w *Proceedings of the Thirteenth International Conference*, New Jersey, 1996. |
| [13] | Y. Yang, H. Luo, H. Xu i F. Wu, „Towards Real-Time Traffic Sign Detection and Classification,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* tom 17, nr 7, pp. 2022 - 2031, czerwiec 2016. |
| [14] | H. Liu, D. Liu i J. Xin, „Real-time recognition of road traffic sign in motion image based on genetic algorithm,” w *Proceedings. International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Beijing, China, 4-5 grudzień 2002. |
| [15] | A. d. l. Escalera, L. E. Moreno, M. A. Salichs i M. Armingol, „Road Traffic Sign Detection and Classification,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS,* tom 44, nr 6, pp. 848 - 859, grudzień 1997. |
| [16] | R. Duda i P. Hart, „Use of the Hough Transformation To Detect Lines and Pictures,” Stanford Research Institute, Menlo Park, California, 1972. |
| [17] | I. M. Creusen, R. G. Wijnhoven, E. Herbschleb i P. D. With, „Color exploitation in hog-based traffic sign detection,” w *International Conference on Image Processing*, Hong Kong, 26-29 wrzesień 2010. |
| [18] | Z. Huang, Y. Yu, J. Gu i H. Liu, „An Efficient Method for Traffic Sign Recognition Based on Extreme Learning Machine,” *IEEE Transactions on Cybernetics,* tom 47, nr 4, pp. 920 - 933, 14 marzec 2016. |
| [19] | T. Ojala, M. Pietikäinen i D. Harwood, „Performance evaluation of texture measures with classification based on Kullback discrimination of distributions,” w *Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition*, Jerusalem, Israel, Israel, 9-13 październik 1994. |
| [20] | G. Wang, G. Ren, Z. Wu, Y. Zhao i L. Jiang, „The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN),” w *Proc. Int. Joint Conf. Neural Netw*, Dallas, TX, USA, 4-9 sierpień 2013. |
| [21] | S. Maldonado-Bascon, S. Lafuente-Arroyo, P. Gil-Jimenez, H. Gomez-Moreno i F. Lopez-Ferreras, „Road-Sign Detection and Recognition Based on Support Vector Machines,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* tom 8, nr 2, pp. 264 - 278, 04 czerwiec 2007. |
| [22] | P. Viola i M. Jones, „Robust Real-time Object Detection,” w *Second International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision*, Vancouver, Canada, 13 sierpień 2001. |
| [23] | C. Bahlmann, Y. Zhu, V. Ramesh, M. Pellkofer i T. Koehler, „A system for traffic sign detection, tracking, and recognition using color, shape, and motion information,” w *IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium*, Las Vegas, NV, USA, USA, 6-8 czerwiec 2005. |
| [24] | R. Kastner, T. Michalke, T. Burbach, J. Fritsch i C. Goerick, „Attention-based traffic sign recognition with an array of weak classifiers,” w *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, San Diego, CA, USA, 21-24 czerwiec 2010. |
| [25] | N. Barnes i A. Zelinsky, „Real-time radial symmetry for speed sign detection,” w *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Parma, Italy, Italy, 14-17 czerwiec 2004. |
| [26] | G. Loy i N. Barnes, „Fast shape-based road sign detection for a driver assistance system,” w *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 28 wrzesień 2004. |
| [27] | M. Mathias, R. Timofte, R. Benenson i L. V. Gool, „Traffic sign recognition-how far are we from the solution?,” w *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Dallas, TX, USA, 4-9 sierpień 2013. |
| [28] | P. Dollár, Z. Tu, P. Perona i S. Belongie, „Integral Channel Features,” Dept. of Electrical Engineering, Los Angeles, Ca, USA, 2009. |
| [29] | A. d. l. Escalera, J. M. Armingol i M. Mata, „Traffic sign recognition and analysis for intelligent vehicles,” *Image and Vision Computing,* tom 21, nr 3, pp. 247-258, marzec 2003. |
| [30] | C.-Y. Fang, S.-W. Chen i C.-S. Fuh, „Road sign detection and tracking,” *Transactions on Vehicular Technology,* tom 52, nr 5, pp. 1329 - 1341, 23 wrzesień 2003. |
| [31] | P. S. Miguel i A. R. Alastair, „Using self-organising maps in the detection and recognition of road signs,” *Image and Vision Computing,* tom 6, nr 27, pp. 673-683, maj 2009. |
| [32] | Z. Zhu, D. Liang, S. Zhang, X. Huang, B. Li i S. Hu, „Traffic-Sign Detection and Classification in the Wild,” w *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas, NV, USA, 27-30 czerwiec 2016. |
| [33] | P. Sermanet, D. Eigen, Z. Xiang, M. Michael, F. Rob i L. Yann, „Integrated recognition localization and detection using convolutional networks,” Courant Institute of Mathematical Sciences, New York, NY, USA, 21 grudzień 2013. |
| [34] | F. Zaklouta, B. Stanciulescu i O. Hamdoun, „Traffic sign classification using K-d trees and random forests,” w *Proceedings of International Joint Conference of Neural Networks*, San Jose, California, USA, 31 lipiec 2011. |
| [35] | T. Szymczyk, „Metoda dopasowania wzorców w rozpoznawaniu obrazów – ograniczenia, problemy i modyfikacje,” w *Automatyka*, Lublin, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, 2008, pp. 449 - 462. |