



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

**DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I
TECHNOLOGIE KOSMICZNE**

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Modele matematyczne wybranych komponentów wizyjnych branży motoryzacyjnej i ich badanie w celu rozwoju systemów aktywnego bezpieczeństwa.

Autor: *Kamil Lelowicz*

Promotor pracy: *dr hab. inż. Adam Piłat, prof. u.*

Promotor pomocniczy: *dr inż. Mateusz Komorkiewicz*

Praca wykonana: *Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Automatyki i Robotyki*

Kraków, 2023

1 Streszczenie

Opracowanie zaawansowanych systemów wspierania kierowcy jest procesem wieloetapowym zawierającym interdyscyplinarne zagadnienia z wielu dziedzin. Celem jest wytworzenie niezawodnego systemu poprawiającego bezpieczeństwo ruchu drogowego. Istotną częścią procesu jest etap walidacji zaprojektowanych rozwiązań na różnych etapach wytwarzania systemu. Aby to osiągnąć, wykorzystuje się symulacje komputerowe, które wymagają modeli matematycznych czujników, sterowników oraz układów wykonawczych wykorzystywanych w pojazdach.

Tematem pracy jest opracowanie funkcjonalnego modelu matematycznego toru wizyjnego dla kamer cyfrowych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym do percepcji otoczenia samochodu. W obecnie wykorzystywanych systemach wspomagania kierowcy sensory wizyjne odgrywają kluczową rolę. Modele matematyczne sensorów są wykorzystywane w głównej mierze podczas wirtualnej walidacji algorytmów, percepcji oraz do fuzji danych w samochodach o wysokim stopniu zautomatyzowania. Wynikiem prac badawczo rozwojowych są modele matematyczne komponentów torów wizyjnych. Opracowano, przedstawiono oraz przeprowadzono walidacje modeli na różnym poziomie abstrakcji.

Model fizyczny koncentruje się na modelu soczewki, a w szczególności modelu dystorsji, która dla szerokokątnych kamer ma duży wpływ na percepcje otoczenia. Przedstawiono procedurę identyfikacji dystorsji z wykorzystaniem metod optymalizacji numerycznej oraz sztucznej inteligencji. Dla opracowanego rozwiązania zaproponowano nowatorski sposób walidacji. Dodatkowo przedstawiono model związany z percepcją kolorów, która ze względu na specyficzne filtry kolorów wykorzystywanych w motoryzacji znacząco odbiega od filtrów RGB. Zaproponowano trzy sposoby rozwiązania problemu konwersji pomiędzy różnymi przestrzeniami filtrów wraz z dogłębną dyskusją na temat jakości poszczególnych metod oraz rozważaniami na temat wpływu zakłóceń na uzyskane rezultaty. Implementacja modelu została zoptymalizowana pod wykorzystanie na kartach graficznych, pozwalając na spełnienie twardych ograniczeń czasowych.

Model na wyższym poziomie abstrakcji operuje na wysokopoziomowych danych. Jako dane wejściowe przyjmuje on położenia, rozmiary i typy obiektów wokół samochodów. Dodatkowo uwzględnia pole widzenia oraz rozdzielczość sensorów. Wykorzystywany jest on do charakteryzacji zbiorów danych wykorzystywanych do walidacji algorytmów. Model ten został podany analizie i zoptymalizowany pod kątem wydajności. Przedstawiono sposób charakteryzacji algorytmów wykorzystanych w systemach percepcji z wykorzystaniem zaproponowanego rozwiązania. Pokazano również obszerny przykład użyteczności modelu na przykładzie przejścia dla pieszych.

2 Motywacja

Projektowanie zaawansowanych systemów wspierania kierowcy (ang. Advanced Driver-Assistance Systems - ADAS) jest wieloetapowym procesem obejmującym zagadnienia interdyscyplinarne z różnych dziedzin nauki między innymi: automatyki, mechaniki, elektroniki czy inżynierii oprogramowania. Proces ten zawiera między innymi: projektowanie układów sterowania, projektowanie i realizację układów elektromechanicznych tworzących elementy wykonawcze i czujniki, projektowanie metodologii oraz urządzeń służących od testowania rozwiązań. Celem całości tych zadań jest opracowanie niezawodnego systemu mającego poprawić bezpieczeństwo w ruchu drogowym. Niezwykle istotną częścią tego procesu jest walidacja zaproponowanych rozwiązań, na różnym etapie wytwarzania systemu oraz różnym poziomie abstrakcji. Do testowania funkcjonalności systemów ADAS wykorzystuje się symulacje komputerowe. Wymagają one modeli matematycznych poszczególnych komponentów: czujników, sterowników oraz układów wykonawczych. Istnieją już dobrze opracowane modele matematyczne dwóch ostatnich komponentów: sterowników oraz

elementów wykonawczych. Obecnie nacisk jest kładziony na opracowywanie modeli matematycznych czujników, które w większym stopniu odwzorowują zachowanie rzeczywistych układów.

3 Teza pracy

Przygotowana rozprawa doktorska bada hipotezę:

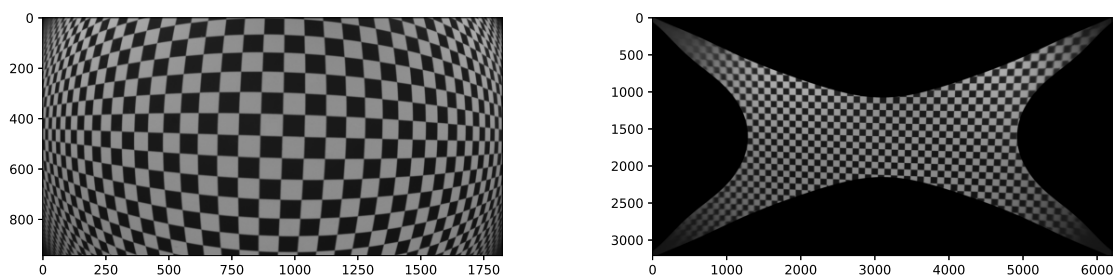
„Modele matematyczne komponentów wizyjnych systemów ADAS korzystnie wpływają na proces projektowania i testowania ich funkcjonalności, odwzorowują rzeczywiste czujniki z oczekiwaną dokładnością, dostarczają wymagane dane oraz spełniają ograniczenia wynikające z działania w reżimie czasu rzeczywistego”.

4 Najważniejsze wyniki pracy

Głównym osiągnięciem pracy jest opracowanie modeli komponentów wizyjnych na różnym poziomie abstrakcji. W przypadku modeli fizycznych skupiono się na modelu soczewki, gdzie przedstawiono procedurę identyfikacji parametrów dystorsji oraz dodatkowo zaprezentowano metody konwersji przestrzeni kolorów. Natomiast w przypadku modelu probabilistycznego zaprezentowano sposób jego konstrukcji oraz przedstawiono sposób identyfikacji parametrów. Wszystkie modele zostały przygotowane w postaci biblioteki C++, pozwalającej na łatwą integrację z symulatorami wirtualnego środowiska.

4.1 Kalibracja kamery

Przemysł motoryzacyjny cechuje się wysokimi wymaganiami względem modelu kamery i jego parametrów. Błąd reprojekcji punktów trójwymiarowych na płaszczyznę kamery powinien wynosić mniej niż 1 piksel, dla obszaru pokrywającego 95% obrazu. W celu zidentyfikowania parametrów modelu kamery zaproponowano procedurę kalibracji, która polegała na wykonaniu pojedynczego zdjęcia szachownicy, przy jednoczesnej znajomości odległości kamery do tej szachownicy. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy obraz z kamery wykorzystywany podczas kalibracji. Natomiast na



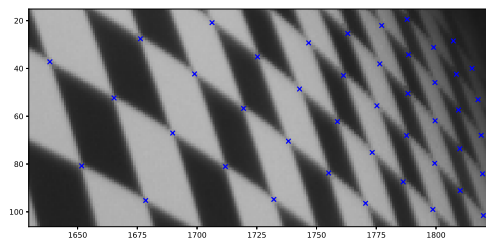
(a) Z dystorsją.

(b) Po usunięciu dystorsji.

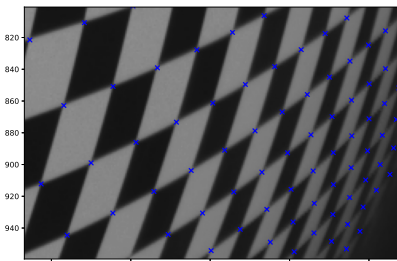
Rysunek 1. Kalibrowany obraz.

rysunku 2 przedstawiono działanie algorytmu odpowiedzialnego na wykrywanie punktu

charakterystycznych na obrazie szachownicy. W szczególności przedstawiono działanie w rogach obrazu, które charakteryzują się największym zniekształceniem wynikającym z dystorsji oraz najmniejszym kontrastem. Wykres 3 przedstawia uzyskaną dystrybuantę błędu reprojekcji. Średni błąd



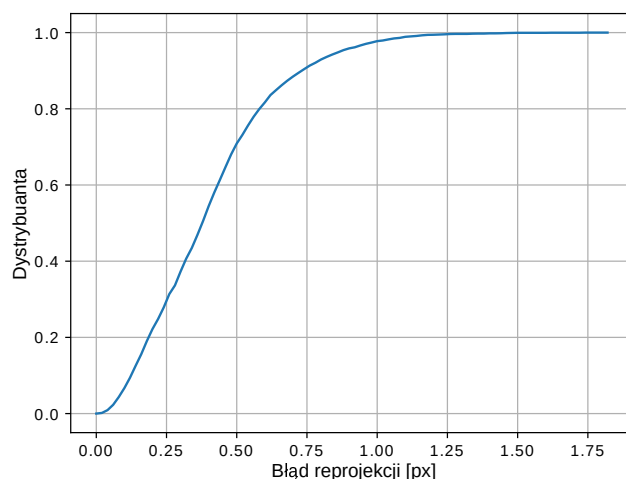
(a) Prawy górny róg.



(b) Lewy dolny róg.

Rysunek 2. Wyjście z algorytmu wykrywania punktów siodłowych. Rogi obrazu.

wyniósł 0,4 piksela, natomiast 95-percentyl błędu reprojekcji był na poziomie 0,88 piksela. Algorytm



Rysunek 3. Dystrybuanta błędu reprojekcji.

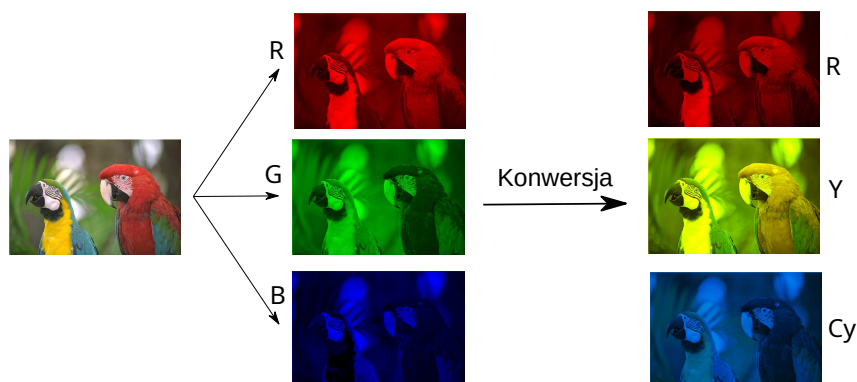
kalibracji został opisany w sekcji 4.2 rozprawy doktorskiej.

4.2 Algorytm transformacji przestrzeni kolorów

W pracy przedstawiono również model konwersji kolorów. W przemyśle motoryzacyjnym wykorzystuje się układy kolorowych filtrów (ang. Color Filter Array - CFA) różniące się od typowych filtrów RGB. Wykorzystuje się filtry RYYCy (czerwony, żółty, żółty, cyjan) oraz RCCC (czerwony, przezroczysty, przezroczysty, przezroczysty). Obecnie symulatory wirtualnego środowiska są w stanie generować dane tylko w formacie RGB. W związku z tym opracowano trzy modele transformacji z przestrzeni RGB do przestrzeni RYCy:

- Analityczny,
- Wielomianowy,
- Oparty o sieć neuronową.

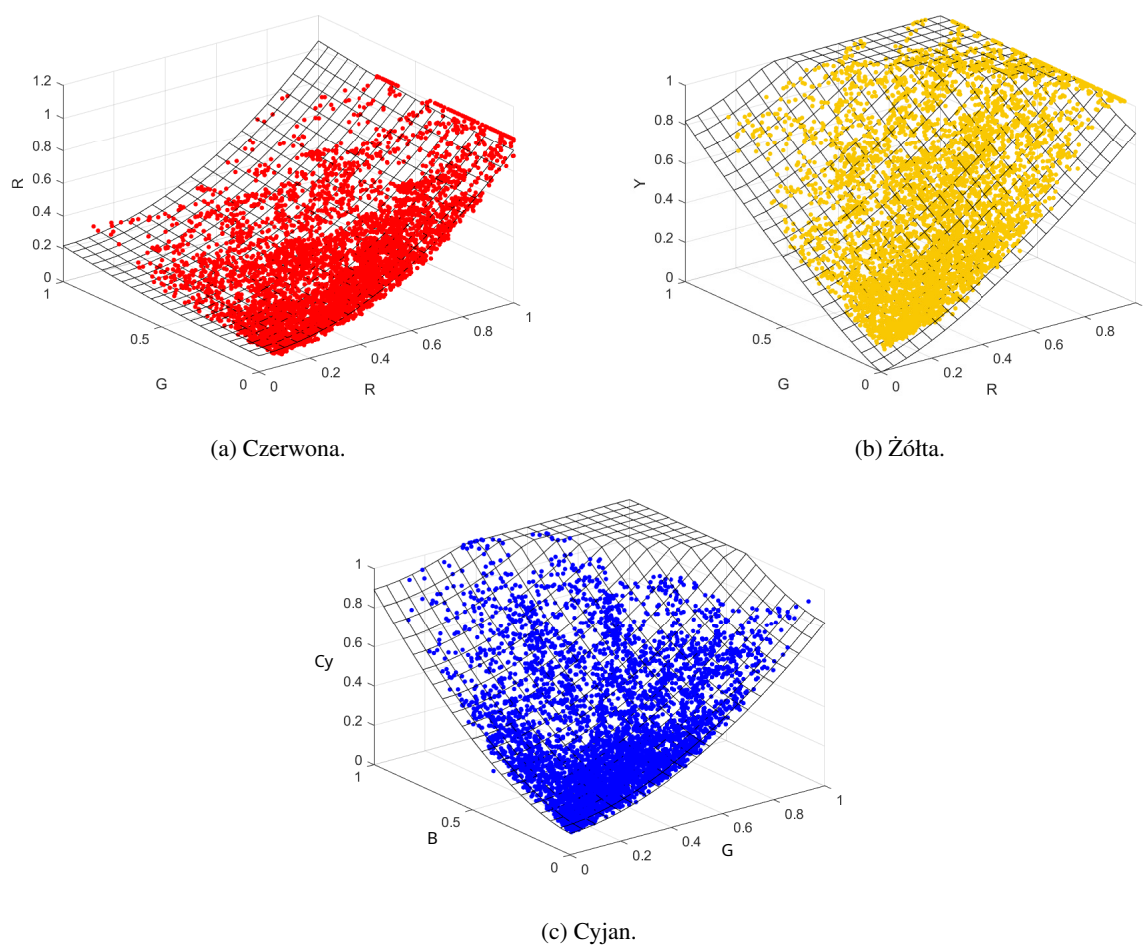
Na rysunku 4 przedstawiono koncepcje konwersji kolorów. Dokładny opis algorytmów został



Rysunek 4. Konwersja z RGB do RYCy.

przedstawiony w sekcji 4.3 rozprawy doktorskiej.

Na rysunku 5 przedstawiono uzyskiwane powierzchnie transformacji dla modelu wielomianowego, który wykorzystywał zaledwie 15 parametrów.



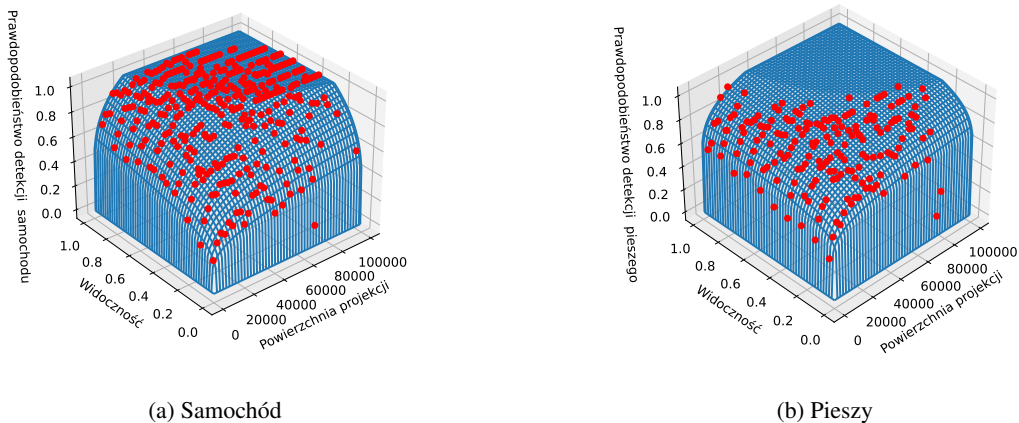
Rysunek 5. Powierzchnie dla modelu wielomianowego.

4.3 Model probabilistyczny

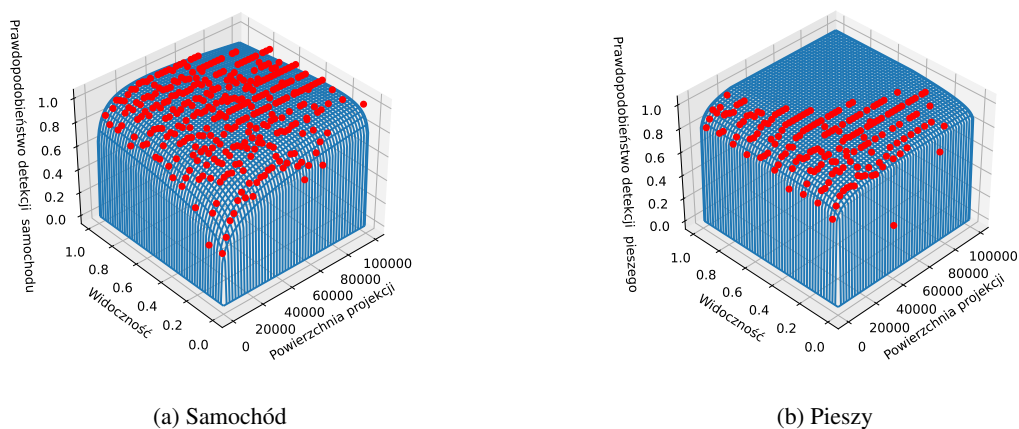
Efektom przeprowadzonych prac był również generyczny model czujnika, który oblicza okluzję w trójwymiarowej przestrzeni bezpośrednio z wysokopoziomowego opisu środowiska składającego się z prostopadłościanów otaczających obiekty takich jak przykładowo samochody, piesi czy cykliści. Dzięki czemu może być bezpośrednio stosowany do analizy etykietowanych zbiorów danych. Wyjścia z modelu stanowiły dwa parametry:

- powierzchnia projekcji obiektu,
- względny ułamek widoczności obiektu.

Przedstawiono sposób parametryzacji modelu dla dwóch algorytmów, który pozwalał określić prawdopodobieństwo wykrycia obiektów przez te algorytmy na podstawie powierzchni projekcji obiektu oraz względnego ułamka widoczności obiektu. Pierwszy z algorytmów FCOS3D opierał się tylko na danych wizyjnych. Drugi analizowany algorytm CenterPoint wykorzystywał dane pozyskiwane z lidar w celu detekcji obiektów w otoczeniu. Wyniki analizy przedstawiono na rysunkach 6 oraz 7. Dokładny opis procedury identyfikacji został podany w sekcji 5.2 rozprawy doktorskiej.



Rysunek 6. Prawdopodobieństwo wykrycia dla algorytmu FCOS3D.



Rysunek 7. Prawdopodobieństwo wykrycia dla algorytmu CenterPoint.

5 Podsumowanie

Celem, jakim postawił sobie autor, było zbadanie użyteczności oraz korzystnego wpływu modeli matematycznych na proces projektowania i testowania funkcjonalności systemów ADAS. Badania dotyczyły modeli matematycznych na różnym poziomie abstrakcji. W pracy przedstawiono modele o dużym stopniu wierności odwzorowania rzeczywistej kamery wykorzystywanej w przemyśle motoryzacyjnym. W szczególności skupiono się na jak dokładniejszym odwzorowaniu dystorsji radialnej występujących w kamerach oraz na specyficznych filtrach kolorów CFA wykorzystywanych w branży motoryzacyjnej. Praca prezentuje też modele matematyczne systemu wizyjnego na wyższym poziomie abstrakcji, wykorzystując do tego opis probabilistyczny sceny wokół pojazdu.

Autor pracy uważa, iż oryginalnymi osiągnięciami pracy są:

- Opracowanie modeli niskopoziomowych o wysokiej wierności z rzeczywistą kamerą oraz sposobu ich identyfikacji.
- Opracowanie metody walidacji modelu dystorsji oraz metodę estymacji błędów i poziomu szumów w przypadku modelu konwersji kolorów.
- Opracowanie implementacji modelu niskopoziomowego w sposób pozwalający na spełnienie twardych wymagań czasu rzeczywistego.
- Przygotowanie modelu na wysokim poziomie abstrakcji w sposób pozwalający na wykonywanie obliczeń w sposób równoległy na architekturach wielordzeniowych.
- Przedstawienie sposobu parametryzacji generycznego modelu z wykorzystaniem dwóch algorytmów percepcji otoczenia oraz demonstracja użyteczności modelu na przykładzie symulacji scenariusza przejścia dla pieszych.

6 Wykaz publikacji i osiągnięć autora

Wykaz publikacji autora:

1. **Kamil Lelowicz**, Michał Jasiński i Adam Krzysztof Piłat. „Discussion of Novel Filters and Models for Color Space Conversion”. W: *IEEE Sensors Journal* 22.14 (2022), s. 14165–14176. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3169805
2. **Kamil Lelowicz** i Adam Krzysztof Piłat. „Generic Sensor Model Usecase Exemplified by Pedestrian Crossing”. W: *IEEE Sensors Journal* 22.22 (2022), s. 21986–21995. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3211092
3. **Kamil Lelowicz**, Michał Jasiński i Marcin Piątek. „Generic Sensor Model for Object Detection Algorithms Validation”. W: *Advanced, Contemporary Control*. Red. Andrzej Bartoszewicz, Jacek Kabziński i Janusz Kacprzyk. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 1249–1260. ISBN: 978-3-030-50936-1
4. **Kamil Lelowicz**. „Camera model for lens with strong distortion in automotive application”. W: *2019 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. 2019, s. 314–319. DOI: 10.1109/MMAR.2019.8864659
5. Mariusz Karol Nowak i **Kamil Lelowicz**. „Weight Perturbation as a Method for Improving Performance of Deep Neural Networks”. W: *2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. 2021, s. 127–132. DOI: 10.1109/MMAR49549.2021.9528460
6. **Kamil Lelowicz** i Jakub Derbisz. „Well Convergent and Computationally Efficient Quaternion Loss”. W: *Advanced, Contemporary Control*. Red. Andrzej Bartoszewicz, Jacek Kabziński i Janusz Kacprzyk. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 1275–1286. ISBN: 978-3-030-50936-1

Wykaz wniosków patentowych zgłoszonych w trakcie trwania doktoratu:

1. **Kamil Lelowicz** i Marcin Piatek. „Method for estimating visibility of objects”. Granted Patent US 11199392 B2 (United States). 14 grud. 2021
2. **Kamil Lelowicz** i Mariusz Nowak. „METHODS AND SYSTEMS FOR DETERMINING PRE-DETERMINED POINTS IN AN INPUT IMAGE”. Patent Application EP 4075384 A1 (European Patent Office). 15 kw. 2021
3. **Kamil Lelowicz** i Mariusz Nowak. „METHODS AND SYSTEMS FOR TRAINING A MACHINE LEARNING METHOD FOR DETERMINING PRE-DETERMINED POINTS IN AN IMAGE”. Patent Application EP 4075327 A1 (European Patent Office). 15 kw. 2021