

Zastosowanie kamer termowizyjnych do detekcji i śledzenia znaczników wizualnych w warunkach ograniczonej widzialności metodami sztucznej inteligencji

Marcin Leplawy, Piotr Lipiński, Barbara Morawska, Jakub Zdanowicz-Zasidko

Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki, al. Politechniki 8, 93-590 Łódź, Polska

Streszczenie: W artykule przedstawiono system wykrywania znaczników ArUco w obrazach termowizyjnych IR, zaprojektowany z myślą o pokonaniu ograniczeń typowych dla tego typu obrazowania, takich jak niska rozdzielczość, szum termiczny, pasmowanie gradientu i brak wyraźnych krawędzi. Klasyczne algorytmy wykrywania znaczników fiducjalnych, skuteczne w obrazach RGB, zawodzą w środowisku IR z uwagi na specyfikę promieniowania ciepłego. Autorzy zaprojektowali wieloetapowy potok przetwarzania wstępnego obrazu, obejmujący m.in. posteryzację, wygładzanie gradientu, wzmocnienie krawędzi i eliminację pasmowania, co umożliwia poprawną identyfikację wzorców binarnych ArUco. Zastosowano również metody estymacji pozy i orientacji w przestrzeni 3D oraz adaptacyjne progowanie binarne z tolerancją błędów dopasowaną do zakłóceń termicznych. Opracowany interaktywny system pozwala użytkownikowi dostosowywać parametry przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym, co znacząco zwiększa skuteczność detekcji znaczników ArUco w zmiennych warunkach środowiskowych. Przeprowadzone testy wykazały poprawę skuteczności detekcji znaczników o około 26 % w porównaniu do standardowych podejść.

Słowa kluczowe: kamery termowizyjne, znaczniki ArUco, detekcja w podczerwieni, przetwarzanie obrazu, sztuczna inteligencja, widzialność ograniczona, nawigacja autonomiczna, systemy wizyjne, znaczniki fiducjalne

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono zastosowanie kamer termowizyjnych do detekcji i śledzenia znaczników wizualnych ArUco [1] w warunkach ograniczonej widzialności z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji [4]. Opracowana metoda została przystosowana do pracy w środowiskach, gdzie zawodzą klasyczne techniki przetwarzania obrazów RGB, a kluczowe staje się pozyskanie informacji z zakresu promieniowania podczerwonego. Rozwiązanie powstało w ramach prac nad nowym systemem wspomagania nawigacji oraz lokalizacji przestrzennej obiektów poruszających się w trudnych warunkach atmosferycz-

nych, takich jak mgła, dym, zadymienie pożarowe czy zaciemnienie całkowite.

Współczesne pojazdy autonomiczne, czyli jednostki zdolne do samodzielnego poruszania się bez udziału operatora dzięki wykorzystaniu zaawansowanych systemów sterowania i percepcji oraz systemy inspekcyjne, coraz częściej wyposażane są w zaawansowane czujniki wizyjne, które umożliwiają pozyskiwanie danych środowiskowych w czasie rzeczywistym. Kamery światła widzialnego, choć szeroko stosowane, mają istotne ograniczenia w warunkach pogorszonej widoczności. W takich sytuacjach kluczową rolę odgrywa obrazowanie termiczne, które umożliwia rejestrację promieniowania ciepłego emitowanego przez obiekty. Integracja kamer termowizyjnych z algorytmami wykrywania znaczników fiducjalnych, takich jak ArUco [2], wymaga jednak zastosowania dedykowanych metod przetwarzania ze względu na odmienną charakterystykę sygnału termograficznego.

W artykule opisano zaprojektowany potok przetwarzania obrazów termowizyjnych, obejmujący etapy wstępnej filtracji, segmentacji cieplnej, morfologii obrazu oraz detekcji znaczników. System wykorzystuje także elementy uczenia maszynowego do poprawy stabilności śledzenia [3] w obecności szumu termicznego, pasmowania gradientu oraz zmiennej emisyjno-

Autor korespondujący:

Marcin Leplawy, marcin.leplawy@p.lodz.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 08.07.2025 r., przyjęty do druku 18.08.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

ści powierzchni. Proponowane podejście znajduje zastosowanie w systemach wspomagania orientacji przestrzennej dla bezzałogowych statków powietrznych (BSP), robotów ratowniczych oraz autonomicznych pojazdów naziemnych pracujących w środowiskach zamkniętych lub nieprzewidywalnych.

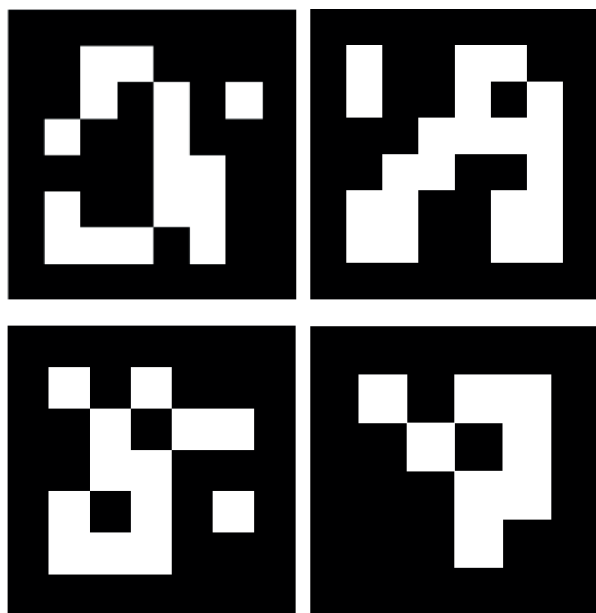
W ramach badań opracowano również zestaw testowy umożliwiający rejestrację sekwencji obrazów z kamery termowizyjnej podczas kontrolowanego ruchu znacznika. Pozwoliło to na przeprowadzenie analizy skuteczności śledzenia w różnych scenariuszach operacyjnych. W artykule zaprezentowano wyniki eksperymentów oraz ocenę jakości detekcji w zależności od rozdzielczości kamery, temperatury tła oraz charakterystyki ruchu. Opracowana metoda może stanowić uzupełnienie klasycznych systemów inercyjnych i wizyjnych, zwiększając niezawodność działania systemów nawigacyjnych w warunkach krytycznych.

2. Zastosowanie ArUco

Znaczniki ArUco należą do rodziny kwadratowych znaczników fiducjalnych, które są powszechnie stosowane w zadaniach lokalizacji i śledzenia pozycji kamery, w szczególności w aplikacjach rzeczywistości rozszerzonej AR (ang. *Augmented Reality*), robotyce mobilnej, autonomicznej nawigacji oraz systemach pomiarowych. Ich nazwa pochodzi od hiszpańskiej grupy badawczej z Uniwersytetu w Kordobie, która opracowała ten system i opublikowała jego podstawy w 2014 r.

Typowy znacznik ArUco (rys. 1) składa się z:

- czarnej ramki zewnętrznej, która ułatwia wykrywanie konturów i pozwala na jednoznaczne wyodrębnienie prostokąta,
- binarnie zakodowanego wnętrza (siatka np. 4×4 lub 5×5), reprezentującego identyfikator znacznika (ID),
- obszaru białego marginesu, oddzielającego wnętrze od otoczenia.



Rys. 1. Przykład czterech różnych kodów ArUco

Fig. 1. Example of four different ArUco codes

Dzięki znajomości geometrii znacznika (cztery narożniki w znanej konfiguracji) możliwe jest wyznaczenie pozycji i orientacji kamery względem znacznika w przestrzeni trójwymiarowej. Warunkiem jest jedynie wcześniejsza kalibracja kamery, pozwalająca określić parametry wewnętrzne (macierz kamery, dystorsje).

Detekcja i dekodowanie

Słowniki ArUco są tworzone w taki sposób, aby maksymalizować odległość między znacznikową, tj. minimalną liczbę

różniących się bitów między dowolnymi dwoma markerami w słowniku, co znacząco zmniejsza ryzyko błędnej identyfikacji. Możliwe jest też dodawanie bitów kontrolnych pozwalających na korekcję błędów, np. przy częściowym zasłonięciu znacznika lub w obecności zakłóceń (np. szumu).

Zalety i przewagi nad innymi systemami

Standardowe znaczniki ArUco zostały zaprojektowane z myślą o detekcji w obrazach RGB, gdzie wysoki kontrast między czarnym obramowaniem a jasnym tłem pozwala na jednoznaczną identyfikację wzorców binarnych. Jednak w warunkach ograniczonej widzialności – takich jak ciemność, mgła, zadymienie czy silne zakłócenia świetlne – kamery RGB zawodzą. Alternatywą w takich scenariuszach są kamery termowizyjne [5], które rejestrują emisję promieniowania ciepłego zamiast światła widzialnego.

Problemy z klasyczną detekcją ArUco w obrazach IR

Bezpośrednie zastosowanie algorytmów wykrywających znaczniki ArUco na obrazach termowizyjnych jest nieefektywne ze względu na:

- niski kontrast cieplny między markerem a tłem (temperatury mogą być zbliżone),
- brak wyraźnych granic geometrycznych (ciepło „rozlewa się” przez materiał),
- pasmowanie gradientu (ang. *banding*), które tworzy fałszywe krawędzie,
- szum termiczny, szczególnie w niechłodzonych kamerach niskiej klasy,
- niską rozdzielczość przestrzenną i tonalną (często tylko 8 bitów głębi),
- refleksy cieplne i nieprzewidywalna emisyjność materiałów.

W efekcie, klasyczne binarne metody progowania obrazu i detekcji konturów zawodzą – marker nie zostaje wykryty lub zostaje błędnie sklasyfikowany.

3. Adaptacja systemu ArUco do obrazowania IR

Aby umożliwić skuteczną detekcję znaczników ArUco [7] w środowisku IR, konieczne jest zastosowanie specjalistycznych rozwiązań zarówno na poziomie sprzętowym, jak i algorytmicznym. Aby dopasować system ArUco do tego szczególnego problemu, niezwykle istotne jest zrozumienie najważniejszych różnic w powszechnie używanej technologii obrazowania IR w stosunku do aparatów pasma światła widzialnego. Ze względu na niższą skalę produkcji oraz wyspecjalizowany zakres zastosowań, sensory kamer podczerwonych są zazwyczaj znacznie droższe od swoich odpowiedników stosowanych w kamerach światła widzialnego.

Kamery termowizyjne, powszechnie dostępne na rynku, cechują się niższą rozdzielczością oraz mniejszą odpornością na zakłócenia pochodzące z otoczenia w porównaniu do kamer światła widzialnego tej samej klasy cenowej. Dodatkowo ich sensory są bardziej wrażliwe na zmiany temperatury powierzchni matrycy wynikające z pracy urządzenia, co ma istotne znaczenie podczas rejestracji obrazów termowizyjnych. W efekcie, uzyskiwane obrazy są zazwyczaj mniej dokładne niż te generowane przez kamery RGB.

Jednym ze sposobów poprawienia jakości danych, na których jest przeprowadzane rozpoznawanie znaczników jest ich fizyczna adaptacja. Markery wycinane są z materiałów o znanych właściwościach termicznych (np. akryl), gdzie wzór ArUco stanowi układ różnie przewodzących lub przepuszczających promieniowanie cieplne powierzchni. Przykładowo: miejsca „czarne”

mogą być wycięte w materiale i przepuszczać ciepło, a reszta blokować emisję.

Technika ta została opisana m.in. w artykule przygotowanym przez naukowców Laboratorium Robotów Autonomicznych [2] pracujących w Uniwersytecie Nevady. Opracowany przez nich system wykorzystuje znaczniki AR jako jeden z kilku elementów systemu SLAM, który opiera się głównie na systemach inercyjnych i działa równolegle (aczkolwiek niezależnie) do komercyjnego rozwiązania ROVIO.

Rozwiązanie to jednak, jak sami badacze podkreślają, wymaga bardzo dokładnie wytworzonych znaczników, o ostrych krawędziach, zachowujących brak jakichkolwiek zniekształceń powierzchni (tzw. *warping*) lub uszkodzeń. Technologia, która jest opisana w artykule, bazuje na współpracy dodatkowych systemów poza analizą termowizyjną, a więc uzależnia skuteczność rozpoznawania markerów i analizy ich pozy od dodatkowych źródeł danych, które mogą nie być dostępne. Przykładowo system inercyjny wykorzystujący magnetyzm lub grawitację, nie będzie w stanie pełnić roli korygującej w trakcie oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego lub pod wodą.

Aby umożliwić wykorzystanie istniejących algorytmów rozpoznawania kodów ArUco, nasz zespół badawczy proponuje wykorzystanie zaawansowanego przetwarzania obrazu razem z opcjonalną modyfikacją samych znaczników.

Zanim obraz trafi do klasyfikatora ArUco, stosuje się specjalny potok filtrujący:

- posteryzacja (redukcja liczby poziomów szarości),
- wygładzanie gradientów cieplnych,
- filtracja szumu,
- adaptacyjne progowanie i normalizacja histogramu,
- rozpoznawanie krawędzi, aproksymujące je w sposób iteracyjny,
- korekcja błędów i estymacja pozycji.

Detekcja ArUco w IR, z wykorzystaniem w ten sposób przygotowanych danych przynosi istotne korzyści:

- działanie w ciemności i przy zerowej widzialności,
- możliwość ukrycia znacznika w paśmie widzialnym (niewidoczny dla człowieka),
- zwiększona odporność na zakłócenia oświetleniowe,
- potencjalne zastosowanie w ratownictwie, wojsku, przemyśle ciężkim i autonomii mobilnej (np. drony w dymie).

4. Cel badań i metodyka badań

Celem badań było opracowanie dedykowanego potoku przetwarzania obrazów termowizyjnych, który umożliwi wiarygodne wykrywanie znaczników ArUco w warunkach termicznych. Badania miały na celu zwiększenie dokładności i niezawodności detekcji znaczników przez zastosowanie zaawansowanych technik przetwarzania wstępnego i analizy obrazu, dostosowanych do specyfiki termografii.

W badaniach zastosowano wieloetapowy potok przetwarzania obrazu, w skład którego wchodziły:

- posteryzacja – ograniczenie liczby poziomów intensywności celem redukcji szumu,
- wygładzanie gradientu – eliminacja pasmowania temperatury przez filtrację adaptacyjną,
- wzmocnienie krawędzi – użycie zmodyfikowanego algorytmu Canny’ego,
- filtrowanie kierunkowe – usuwanie artefaktów pasmowania,
- progowanie adaptacyjne – binaryzacja oparta na lokalnym kontraście,
- dopasowanie do słownika znaczników – identyfikacja markerów przy użyciu słownika ArUco z podniesioną tolerancją błędów,

- estymacja orientacji i pozycji 3D – wykorzystanie algorytmu solvePnP z macierzą kamery.

Dodatkowo opracowano interfejs użytkownika umożliwiający regulację parametrów przetwarzania w czasie rzeczywistym oraz obserwację wpływu poszczególnych etapów na wynik detekcji.

5. Opis badań

Przedmiotem badania jest skuteczność detekcji znaczników fiducjalnych ArUco w obrazach termowizyjnych [6] (IR) oraz opracowanie metod poprawiających niezawodność ich wykrywania w warunkach ograniczonego kontrastu i zakłóceń charakterystycznych dla termografii. Znaczniki ArUco, powszechnie stosowane w systemach wizyjnych do estymacji pozycji, kalibracji kamer i rozszerzonej rzeczywistości, zostały pierwotnie zaprojektowane z myślą o obrazach RGB o wysokim kontraście i ostrości. Ich bezpośrednie zastosowanie do obrazów IR okazuje się nieefektywne ze względu na szereg unikalnych właściwości obrazów termicznych.

W ramach badań skupiono się na analizie wpływu charakterystycznych zjawisk występujących w obrazach termowizyjnych – takich jak pasmowanie gradientu temperatury, ograniczony zakres dynamiczny, szum termiczny, bezwładność cieplna oraz zmienna emisyjność materiałów – na jakość detekcji znaczników. Stwierdzono, że czynniki te prowadzą do zacierania konturów znaczników, generowania fałszywych krawędzi oraz zaburzenia wzorców binarnych, co znacząco obniża skuteczność działania standardowych algorytmów detekcji opartych na bibliotece OpenCV.

W celu zniwelowania wpływu tych czynników na pomyślne rozpoznanie znacznika, zaproponowany został algorytm detekcji znacznika ArUco (rys. 2) widniejącego na obrazie IR.



Rys. 2. Diagram opisujący etapy procesu rozpoznawania znaczników ArUco

Fig. 2. Diagram illustrating the stages of the ArUco marker recognition process

Etap I

W ramach pierwszego kroku, stosowane są metody mające na celu poprawę charakterystyki zdjęć, w sposób który zniweluje problematyczne aspekty wykonywania zdjęć w spektrum podczerwieni. Pierwszy krok to zastosowanie niewielkiej liczby posteryzacji, która celowo redukuje szczegółowość gradientów termicznych. Pomaga to zredukować liczbę artefaktów, ponieważ dalsza część algorytmu – wygładzanie gradientu – wymaga wtedy mniej operacji, aby uzyskać ostre przejścia między materiałami o wysokiej różnicy temperatur, czyli w tym przypadku pixeli ON/OFF. Bardziej jednolite obszary kolorystyczne są szczególnie istotne w drugim etapie, wykrywającym krawędzie znacznika, przed którym zdjęcie przechodzi jeszcze wzmocnienie krawędzi i redukcję pasmowania.

Jeżeli znana jest paleta barw użyta przy wykonywaniu zdjęć, możliwe jest zastosowanie na tym etapie, który w późniejszym czasie ma pozytywny wpływ na binaryzację odbywającą się w detektorze ArUco biblioteki OpenCV.

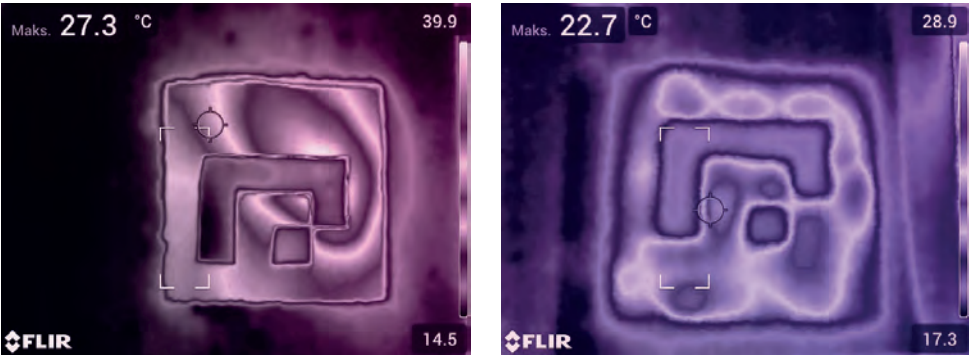
Na rysunku 3 przedstawiono mapowanie z palety standardowej IR na postać, w której występuje tylko jedna barwa. Jest to

szczególnie ważne, gdy zdjęcia źródłowe korzystają np. z palety „Rainbow”, w której intensywność koloru nie odpowiada bezpośrednio za wartość temperatury. W efekcie klasyczna binaryzacja nie może ich wiarygodnie przedstawić.

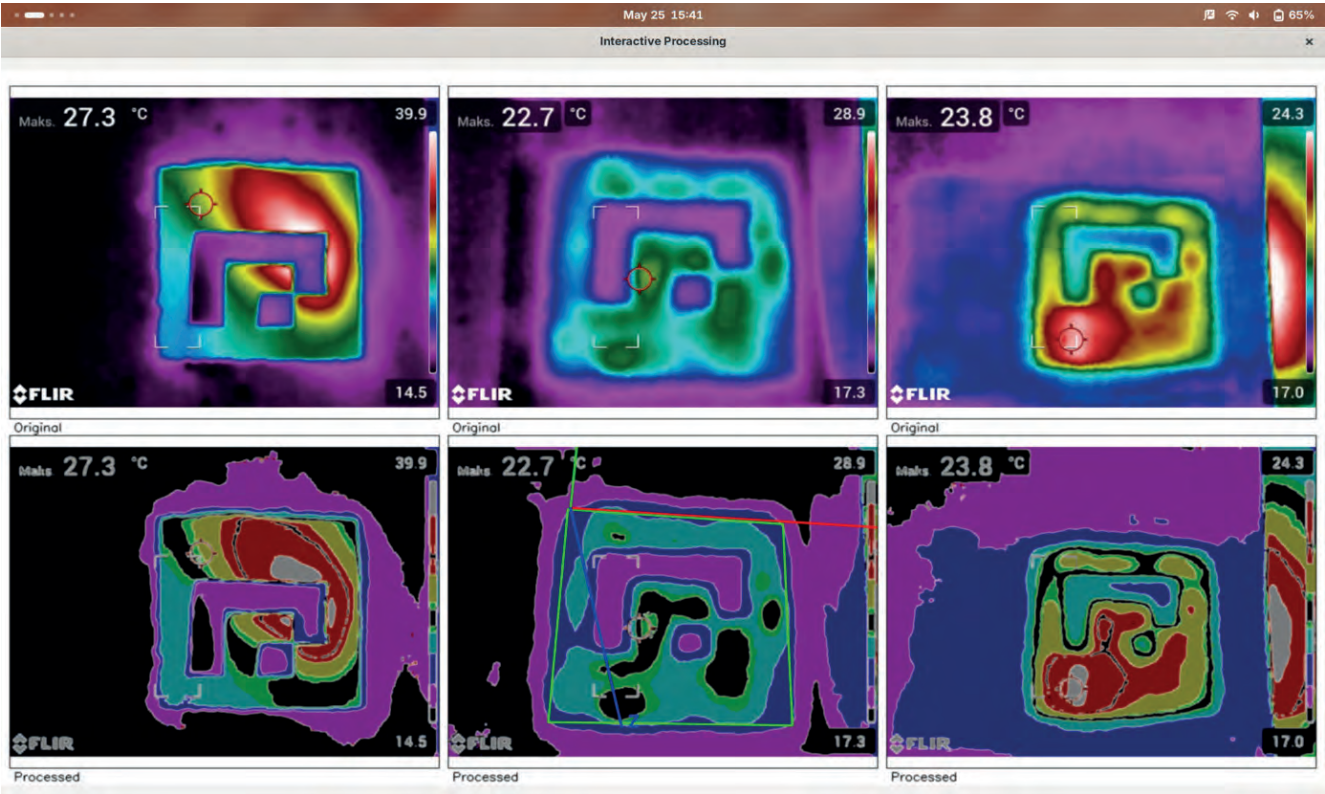
Etap II

Podczas drugiego etapu odbywa się przeszukiwanie obrazu w celu znalezienia regularnych krawędzi i detekcji położenia oraz orientacji znacznika. Zalecana implementacja powinna wykonać rozpoznawanie z użyciem różnych poziomów intensywności wykrywania krawędzi w celu poprawy jej działania niezależnie od różnic między zdjęciami, co zostało zaznaczone na diagramie (rys. 4).

- Przypadek 1. (lewy) – minimalna poprawa, detekcja nieudana z powodu odbić termicznych.
- Przypadek 2. (środkowy) – udana detekcja po przetworzeniu, wcześniej niemożliwa.
- Przypadek 3. (prawy) – detekcja nieudana z powodu nasycenia termicznego.



Rys. 3. Mapowanie palety termowizyjnej do postaci reprezentowanej przez nasycenie jednego koloru
Fig. 3. Mapping of the thermal palette to a form represented by the saturation of a single color

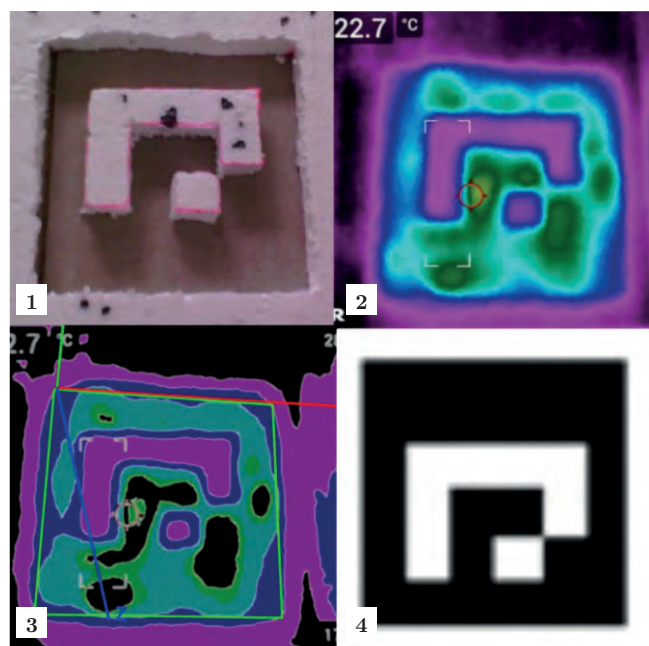


Rys. 4. Wyniki detekcji – oryginalne obrazy termowizyjne (u góry) i obrazy po przetworzeniu z wykrytymi znacznikami (u dołu)
Fig. 4. Detection results – original thermal images (top) and processed images with detected markers (bottom)

Tabela 1. Porównanie różnych podejść w zakresie rozpoznawania kodów ArUco

Table 1. Comparison of different approaches to ArUco code recognition

	Hybrydowe podejście wykorzystujące głównie preprocessing	Opracowane dotąd rozwiązania [8]
Materiał znaczników	Możliwy do dostosowania względem warunków lub kosztów	Wyrażna rekomendacja jednego materiału, najczęściej akrylu
Koszt całkowity	System w wersji bazowej wymaga jedynie obrazowania podczerwonego	Oprócz kamery termowizyjnej, do osiągnięcia pełnej bazowej funkcjonalności, wymagany jest zakup działającego równolegle, dodatkowego systemu mapującego. Dodatkowy koszt wynika z wymagań odnośnie materiału znaczników
Odporność na warunki zewnętrzne (np. opady, wysoka temperatura)	Algorytm uwzględnia korekcję zdjęć znaczników, które nie mają ostrych krawędzi lub są poddane nierównomiernemu rozkładowi temperatury	Jakość rozpoznawania zależna jest od dobrego stanu znaczników. Krawędzie zniekształcone, np. wpływem temperatury spowodowanej przez pożar, uniemożliwiają pracę w trudnych warunkach



Rys. 5. Etapy rozpoznania kodu ArUco w IR

Fig. 5. Stages of ArUco code recognition in infrared (IR) imagery

Etap III

W końcowym kroku, po wykryciu znacznika ArUco, wykorzystuje się funkcję odpowiadającą za odczyt identyfikatora znacznika oraz zwrócenie wyniku w postaci identyfikatora znacznika ArUco.

1. Obraz referencyjny RGB – znacznik ArUco w dobrych warunkach oświetleniowych, gdzie algorytmy standardowe działają bez problemu.
Wyraźne kontrasty pianki i podłoża umożliwiają łatwą identyfikację wzoru binarnego znacznika oraz jego granic.
2. Surowy obraz termowizyjny – obraz IR podobnego znacznika o tym samym ID ujawnia kluczowe wyzwania obrazowania termicznego.

Znacznik jest praktycznie niewidoczny z powodu:

- braku wyraźnego kontrastu termicznego między materiałami znacznika,
- nierównomiernej temperatury powierzchni,
- odbić termicznych z otoczenia,
- szumu czujnika termowizyjnego.

3. Obraz po przetworzeniu:

Zastosowanie algorytmu przetwarzania znacząco poprawia widoczność znacznika przez:

- wygładzanie gradientu, które eliminuje pasmowanie temperaturowe,
- posteryzacje, redukująca szum termiczny do bardziej regularnych wartości,
- wzmocnienie krawędzi, podkreślające granice znacznika,
- opcjonalne adaptacyjne progowanie, optymalizujące kontrast lokalny.

Rezultatem jest obraz, w którym struktura znacznika staje się wyraźnie rozróżnialna, mimo że nadal nie osiąga jakości obrazu RGB.

- #### 4. Wykryty kod ArUco:

Finalna detekcja pokazuje pomyślne rozpoznanie znacznika

Holistyczne podejście względem tematyki problemowej pozwala na zrozumienie, z czego wynika trudność wykorzystania zdjęć IR. Użycie różnych form modyfikacji danych, przed zastosowaniem algorytmu wykrywającego, pozwala zmniejszyć wpływ wad tego typu formy obrazowania, jednocześnie umożliwiając wykorzystanie jego unikalnych możliwości.

Rozpoznawanie markerów na podstawie tak przygotowanych danych zostało porównane z podejściem wykorzystującym jedynie modyfikację znaczników (tab. 1).

6. Podsumowanie

Testy przeprowadzono na zróżnicowanym zbiorze obrazów termowizyjnych, reprezentujących różne scenariusze środowiskowe i konfiguracje znaczników. Porównano skuteczność detekcji przed i po zastosowaniu zaproponowanego potoku przetwarzania. Uzyskano następujące wyniki:

- średni wzrost skuteczności detekcji znaczników ArUco o około 26 % w stosunku do metody bazowej,
- poprawa stabilności śledzenia znaczników w obecności szumu i niskiego kontrastu,
- skuteczna eliminacja pasmowania i artefaktów powodujących fałszywe detekcje.

Przypadki, w których detekcja nie powiodła się, mimo zastosowanego przetwarzania, dotyczyły głównie nasycenia termicznego lub odbić od powierzchni znacznika.

W artykule zaprezentowano skuteczne podejście do poprawy detekcji znaczników ArUco w obrazach termowizyjnych, wykorzystujące dostosowany potok przetwarzania obrazu oraz interaktywny system do optymalizacji parametrów. Przeprowadzone analizy wskazują, że typowe parametry kamer termowizyjnych – w szczególności ich czułość termiczna określana jako NETD (ang. *Noise Equivalent Temperature Difference*) – są wystarczająco

jące do realizacji omawianych algorytmów detekcji w warunkach spotykanych w klimacie umiarkowanym.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że rozwój algorytmów detekcji opartych na obrazach termowizyjnych, w szczególności z użyciem uczenia maszynowego, wymaga uwzględnienia niestandardowych zależności przestrzenno-czasowych oraz zapewnienia odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa w zakresie SNR (ang. *signal-to-noise ratio*). Jednocześnie największa wartość poznawcza testów algorytmów ujawnia się w warunkach granicznych, na pograniczu skuteczności detekcji.

Bibliografia

1. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F., Marín-Jiménez M., *Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion*, "Pattern Recognition", Vol. 47, No. 6, 2014, 2280–2292, DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005.
2. Khattak S., Papachristos C., Alexis K., *Marker Based Thermal-Inertial Localization for Aerial Robots in Obscurant Filled Environments*, [In:] *Advances in Visual Computing*, Springer, 2018, 565–575, DOI: 10.1007/978-3-030-03801-4_49.
3. Sadzyński P., *Metody zwiększania ilości danych termowizyjnych w uczeniu maszynowym*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, Vol. 28, No. 1, 2024, 97–106, DOI: 10.14313/PAR_251/97.
4. Redmon J., Farhadi A., *YOLO9000: Better, Faster, Stronger*, arXiv preprint, arXiv:1612.08242, 2016, DOI: 10.48550/arXiv.1612.08242.
5. Mścichowski M., Sawicki K., Sosnowski T., Firmanty K., Kastek M., Bareła J., *Metoda pomiaru parametrów kamer termowizyjnych za pomocą zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, Vol. 28, No. 3, 2024, 131–138, DOI: 10.14313/PAR_253/131.
6. Holst G.C., *Electro-optical Imaging System Performance*, 6th ed., Washington: Society of Photo Optical, 2017, DOI: 10.1117/3.2588947.
7. Berral-Soler R., Muñoz-Salinas R., Medina-Carnicer R., Marín-Jiménez M.J., *DeepArUco++: Improved detection of square fiducial markers in challenging lighting conditions*, "Image and Vision Computing", Vol. 152, 2024, DOI: 10.1016/j.imavis.2024.105313.

Application of Thermal Imaging Cameras for Visual Marker Detection and Tracking in Limited Visibility Conditions Using Artificial Intelligence Methods

Abstract: This article presents a system for detecting ArUco markers in thermal infrared (IR) images, designed to overcome the typical limitations of this imaging modality, such as low resolution, thermal noise, gradient banding, and the absence of distinct edges. Conventional fiducial marker detection algorithms, effective in RGB images, fail in IR environments due to the specific nature of thermal radiation. The author developed a multi-stage preprocessing pipeline including posterization, gradient smoothing, edge enhancement, and banding elimination, enabling accurate identification of binary ArUco patterns. Additionally, methods for estimating position and orientation in 3D space were implemented, along with adaptive binary thresholding with error tolerance tailored to thermal disturbances. The developed interactive system allows users to adjust image processing parameters in real time, significantly improving ArUco marker detection performance in varying environmental conditions. Tests conducted showed an approximately 26 % improvement in detection accuracy compared to standard approaches.

Keywords: thermal imaging cameras, ArUco markers, infrared detection, image processing, artificial intelligence, limited visibility, autonomous navigation, vision systems

dr inż. Marcin Leplawy
 marcin.leplawy@p.lodz.pl
 ORCID: 0009-0005-3996-8507

Adiunkt w Instytucie Informatyki Politechniki Łódzkiej. Autor kilkunastu publikacji naukowych z zakresu przetwarzania sygnałów i obrazów, systemów lokalizacji oraz sztucznej inteligencji. W 2024 r. obronił doktorat dotyczący lokalizacji obiektów z wykorzystaniem heterogenicznych pomiarów odległości. Uczestniczył w międzynarodowym projekcie Intercultural Excellence in Mechatronic Engineering Education (IEMEE) realizowanym na University of Melbourne w Australii.



dr hab. inż. Piotr Lipiński, prof. PŁ
 piotr.lipinski@p.lodz.pl
 ORCID: 0000-0002-8269-3802

Ukończył studia inżynierskie i magisterskie na kierunku elektrotechnika na Politechnice Łódzkiej (2000), uzyskał stopień doktora w dziedzinie informatyki na Politechnice Gdańskiej (2004), a stopień doktora habilitowanego w Polsko-Japońskiej Akademii Technik Komputerowych (2013). W latach 2005–2018 był adiunktem w Instytucie Informatyki Politechniki Łódzkiej, a od 2018 r. pracuje na stanowisku profesora uczelni w tej samej jednostce. Autor dwóch monografii, ponad 40 artykułów naukowych oraz autor patentu. Zainteresowania naukowe obejmują znakowanie cyfrowe, przetwarzanie sygnałów, transformaty adaptacyjne oraz lokalizację. Uczestnik i koordynator licznych projektów naukowych, przemysłowych i edukacyjnych. Laureat nagrody za najlepszy referat sesji podczas konferencji World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics w Orlando (USA) w 2007 r.



mgr inż. Barbara Morawska
 barbara.morawska@dokt.p.lodz.pl
 ORCID: 0000-0002-5307-9424

Doktorantka w dziedzinie Informatyki Technicznej i Telekomunikacji na Wydziale Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej od 2021 r. W tym samym roku uzyskała tytuł magistra Informatyki Stosowanej. Jej zainteresowania badawcze obejmują lokalizację, przetwarzanie sygnałów oraz uczenie maszynowe. Brała udział w wielu projektach badawczych i edukacyjnych, które zaowocowały publikacjami w renomowanych czasopiśmiech oraz prezentacjami na prestiżowych konferencjach. Doświadczenie zawodowe zdobywała w zespołach badawczo-rozwojowych zajmujących się przetwarzaniem danych geograficznych i modelowaniem ruchu drogowego.



Jakub Zdanowicz-Zasidko
 251668@edu.p.lodz.pl
 ORCID: 0009-0005-1114-5576

Student kierunku Informatyka Stosowana prowadzonego przez Politechnikę Łódzką. Absolwent 9. Technikum im. KEN w Łodzi. Interesuje się robotyką, architekturą oprogramowania i systemami wbudowanymi. Hobbistycznie projektuje i wykonuje od podstaw różne urządzenia elektroniczne, wykorzystując oprogramowanie CAD, metody nanoszenia ścieżek połączeniowych na laminaty miedziane i druk 3D.

