RDITT- wpł. 02.07.2025 r.
M. Kw

Prof. zw. dr hab. n.mat. inż. Jerzy August Gawinecki
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
Wojskowa Akademia Techniczna
im. Jarosława Dąbrowskiego
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa tel. 601 209 808, 695 030 113
e-mail: jerzy.gawinecki@wat.edu.pl

Warszawa 27.6.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej

Tytuł rozprawy: Sprzętowa implementacja algorytmów korekcji niejednorodności matryc bolometrycznych o wysokiej rozdzielczości

Autor rozprawy: mgr inż. Jan Kwiatkowski

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Aleksander Nawrat

I. Cel badań i tezy rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr. inż. Jana Kwiatkowskiego napisana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Aleksandra Nawrata na Politechnice Śląskiej (Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki) posiada klasyczną strukturę pracy naukowej: liczy 136 stron, napisana jest w języku polskim, składa się z pięciu rozdziałów: wstępu, przeglądu literatury, proponowanego rozwiązania, badań doświadczalnych oraz podsumowania. Dodatkowo praca zawiera obszerną bibliografię (100 pozycji) oraz pięć dodatków.

Mówiąc ogólnie: praca podejmuje **istotną tematykę z zakresu przetwarzania obrazów termowizyjnych**.

Mówiąc bardziej szczegółowo: praca poświęcona jest **metodom identyfikacji i korekcji niejednorodności** danych obrazowych uzyskanych z matryc, wrażliwych na promieniowanie podczerwone tzw. *matryc bolometrycznych* o wysokiej rozdzielczości w celu poprawy jakości wynikowego obrazu.

Głównym celem rozprawy stanowi propozycja dedykowanego *algorytmu korekcji niejednorodności dotyczącego korekcji termogramów* uzyskanych za *pomocą niechłodzonej matrycy bolometrycznej o rozdzielczości* 1024×768 *pikseli*. Propozycja została oparta o przegląd publikacji dotyczących literatury przedmiotu.

Autor dysertacji przedstawił warunki brzegowe docelowego rozwiązania dotyczące działania algorytmu w czasie zbliżonym do rzeczywistego z zastosowaniem akceleracji sprzętowej w układzie logiki programowalnej jak również z uwzględnieniem nieliniowości charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów tworzących matrycę termowizyjną. W zakresie wyżej wymienionej tematyki Autor formułuje trzy główne tezy pracy:

1. Możliwe jest stworzenie i **sprzętowa implementacja adaptacyjnego algorytmu**, którego zadaniem jest estymacja i korekcja zakłócenia o stałej charakterystyce występującego w strumieniach wideo uzyskanych za pomocą matrycy **mikrobolometrycznej** o *wysokiej rozdzielczości.*

2. Możliwa jest **realizacja algorytmu korekcji niejednorodności** według tezy 1, realizowanego w czasie zbliżonym do rzeczywistego, determinowanym szybkością **akwizycji** danych pomiarowych, dedykowanego dla **matryc mikrobolometrycznych o wysokiej rozdzielczości**.

3. Możliwa jest sprzętowa **implementacja adaptacyjnego algorytmu korekcji niejednorodności** według tez 1 i 2 pozwalającego na uwzględnieniu **nieliniowości charakterystyk** odpowiedzi **mikrobolometrów**, wchodzących w skład matrycy mikrobolometrycznej o wysokiej rozdzielczości na *radiację podczerwoną emitowaną przez obiekty w obserwowanej scenie.*

Uważam, że tezy są jasno sformułowane oraz oddają poprawnie zakres rozprawy.

Tematyka badań przedstawiona w rozprawie jest aktualna oraz istotna, gdyż **kamery termowizyjne** w ostatnich latach są intensywnie rozwijane oraz znajdują zastosowanie nie tylko w **rozwiązaniach militarnych** ale również w wielu dziedzinach nauki, medycyny, przemysłu, w różnych celach specjalnych.

Należy podkreślić, że znanych jest wiele metod analizy i integracji obrazów, natomiast są one ciągle rozwijane oraz modernizowane. W rozprawie Autor opisał **nową metodę korekcji niejednorodności dedykowaną implementacji** w układzie programowalnym.

II. Charakter rozprawy (teoretyczny, doświadczalny, konstrukcyjny)

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny, koncentrując się na analizie stanu wiedzy naukowej w zakresie korekcji niejednorodności **termogramów** oraz na propozycji **autorskiego rozwiązania** wynikającego z analizy istniejącego stanu wiedzy.

Zostało w rozprawie przedstawione rozwiązanie konstrukcyjne – *kamera termowizyjna*, służąca za *stanowisko laboratoryjne*, podczas badań zaproponowanego algorytmu.

Należy również podkreślić wykonaną przez Autora rozprawy *implementacje sprzętową sterownika kamery* oraz dedykowane oprogramowanie do jej obsługi.

9

III. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle)

Rozdział pierwszy wprowadza czytelnika w tematykę pracy definiując cel badań i uzasadniając znaczenie podejmowanej problematyki. Autor wskazuje na istotność **korekcji niejednorodności** w obrazach termowizyjnych, przede wszystkim na zakłócenia o stałym wzorcu (FPN – Fixed Pattern Noise), które negatywnie wpływają na jakość obrazu.

W rozdziałach drugim przedstawionej do recenzji **dysertacji** Autor przeprowadził analizę stanu wiedzy w zakresie dotyczącym tematyki **rozprawy**. Można powiedzieć, że rozdział drugi stanowi obszerny przegląd literatury, w którym Autor systematycznie klasyfikuje metody **korekcji** niejednorodności na trzy główne kategorie:

- metody kalibracyjne (CB-NUC) – Calibration-Based Non-Uniformity Corection – korekcja niejednorodności bazująca na danych kalibracyjnych
- metody bazujące na analizie sceny (SB-NUC) – Scene Based Non-Uniformity Correction – korekcja niejednorodności bazująca na analizie sceny
- metody korekcji zakłóceń kolumn (SNUC – Stripe Non-Uniformity Correction – korekcja zakłóceń kolumn.

W ramach każdej kategorii szczegółowo omówiono liczne warianty algorytmów przedstawiając ich założenia, zalety i wady.

Autor analizuje również **istniejące implementacje sprzętowe**, co stanowi solidną podstawę do opracowania własnego rozwiązania.

Należy stwierdzić, że analiza źródeł została przeprowadzona w sposób profesjonalny obejmując szeroko pojęte zagadnienia **korekcji niejednorodności matryc bolometrycznych**.

Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki związanej z zastosowaniem algorytmów korekcji niejednorodności **matryc podczerwonych**. W przeglądzie literatury poprawnie sklasyfikował, skatalogował i opisał wybrane metody korekcji niejednorodności zwracając szczególną uwagę na znane sprzętowe realizacje opisywanych metod.

Należy podkreślić, że w wykazie publikacji liczącym 100 pozycji widnieją publikacje w których Doktorant jest autorem lub współautorem – czterech wspólnych publikacjach w recenzowanych materiałach z międzynarodowych konferencji naukowych ujętych w ministerialnym wykazie czasopism, siedmiu rozdziałach w monografiach naukowych, ujętych w ministerialnym wykazie wydawnictw.

Sposób przeprowadzenia analizy źródeł odpowiada potrzebom rozprawy, zatem należy uznać go za właściwe. Autor wykorzystał wielorakie źródła: artykuły opublikowane w recenzowanych czasopismach, monografie, doniesienia konferencyjne, zgłoszenia patentowe.

IV. Rozwiązanie postawionego zadania; właściwość przyjętych metod i założeń

Udowodnienie tez rozprawy, wymagało rozwiązania kilku istotnych problemów badawczych.

Autor precyzyjnie opisał wymagane do rozwiązania zadania, wykonał czasochłonne badania symulacyjne i eksperymentalne oraz udowodnił stawiane na wstępie rozprawy

tezy. Jak już wspominano powyżej w rozdziale drugim rozprawy Autor w wystarczającym stopniu opisał i scharakteryzował dotychczas stosowane metody korekcji niejednorodności matryc **bolometrycznych**, podał klasyfikację algorytmów oraz opisał różnego rodzaju podejścia bazując na literaturze przedmiotu.

Rozdział trzeci przedstawia autorskie rozwiązanie, obejmujące **korekcję zakłóceń kolumn** oraz **korekcję niejednorodności z uwzględnieniem nieliniowości charakterystyk mikrobolometów**. Rozwiązanie zostało zaproponowane z uwzględnieniem możliwości jego realizacji w rozwiązaniu **sprzętowym** z uwzględnieniem wspomnianych wyżej **nieliniowości charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów** wchodzących w skład matrycy.

Proponowane podejście stanowi odpowiedź na zidentyfikowane w przeglądzie literatury luki badawcze.

Rozdział czwarty opisuje badania doświadczalne, prezentując stanowisko laboratoryjne oraz wyniki eksperymentów weryfikujących skuteczność proponowanych rozwiązań. Autor porównuje efektywność różnych **realizacji metod korekcji niejednorodności analizując wpływ ilości i jakości danych statystycznych na końcowe rezultaty**.

Autor w tym rozdziale wykazał i udowodnił, że zaproponowana w rozprawie metoda korekcji niejednorodności daje prawidłowy wynik. Należy nadmienić, że w rozdziale Autor zaprezentował także wyniki uzyskane za pomocą sprzętowej implementacji zaproponowanego podejścia.

Podsumowując rozwiązanie postawionego zadania obejmuje propozycję **autorskiego algorytmu korekcji niejednorodności**, który posiada cechy adaptacyjności i uwzględnia **nieliniowości charakterystyki mikrobolometrów**. **Algorytm** ten został zaimplementowany sprzętowo co pozwala na jego efektywne działanie w czasie **zbliżonym do rzeczywistego**.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie pracy, ocenę realizacji postawionych tez oraz kierunki dalszych badań.

V. Oryginalność rozprawy; samodzielny dorobek Autora; pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy prezentowanego w literaturze światowej

Praca prezentuje pogłębioną wiedzę teoretyczną z zakresu przetwarzania obrazów termowizyjnych czego dowodem jest systematyczny przegląd literatury w rozdziale drugim. Autor dokonał klasyfikacji metod korekcji niejednorodności (CB-NUC, SB-NUC, SNUC). Szczegółowo omówił implementacje sprzętowe oraz **analizował nieliniowości charakterystyk mikrobolometrów** – aspekt często pomijany w literaturze. Wykorzystanie równań matematycznych takich jak model odpowiedzi mikrobolometru (2.1) czy równanie Planka (2.5) – świadczy o znajomości zaawansowanego aparatu matematycznego.

Samodzielność badawczą potwierdza opacowanie autorskiego algorytmu łączącego **korekcję zakłóceń kolumn** (SNUC) z **adaptacyjną korekcją nieliniową** (patrz rozdział 3).

Projekt stanowiska laboratoryjnego (4.1) oraz walidacja eksperymentalna obejmująca redukcję FPN – Fixed Pattern Noise (zakłócenie o stałym wzorcu), w porównaniu z metodą CS-NUC (Constant Statistics Non-Uniformity Correction – statystyczna metoda

korekcji niejednorodności) wykazują umiejętność Doktoranta do **integracji wiedzy teoretycznej** z **praktycznym wdrożeniem**.

Oryginalność rozwiązania (art. 187 ust. 2)

Praca wnosi trzy istotne innowacje do dziedziny inżynierii elektronicznej:

- implementację sprzętową dla matryc XGA (eXtended Graphics Array) – **rozdzielczość obrazu** 1024×768 **pikseli**) przewyższająca dotychczasowe rozwiązania (maks. 640 × 512 pikseli), co stanowi odpowiedź na lukę badawczą zidentyfikowaną w przeglądzie literatury
- uwzględnienie **nieliniowości charakterystyk mikrobolometrów** – **unikatowe** podejście w kontekście adaptacyjnych metod SB-NUC (Scene-Based Non-Uniformity Correction) – korekcja niejednorodności, bazująca na analizie sceny, potwierdzone eksperymentalnie dla szerokiego zakresu radiacji
- **hybrydowy algorytm** łączący SNUC (Stripe Non-Uniformity Correction) – **korekcję zakłóceń kolumn**) i **adaptacyjną korekcję nieliniową** – brak bezpośrednich analogii w literaturze, **co potwierdzają** wyniki porównawcze z metodą CR-NUC (Constant Range Non-Uniformity Correction – statystyczna metoda korekcji niejednorodności) (rozdział 4.6)

Wartym odnotowania jest fakt wykonania przez Doktoranta kompleksowej analizy aktualnego stanu wiedzy.

Rozdział drugi stanowi wartościowe kompendium metod korekcji niejednorodności wykorzystujące ponad 100 źródeł, w tym patenty (np. [93–95]) i dokumentacją techniczną (FLIR Lepton [100]). W pracy przedstawiono także eksperymentalną walidację zaproponowanego algorytmu uwzględniającą wpływ czynników środowiskowych i inne istniejące metody takie jak CS-NUC (Constant Statistic Non-Uniformity Correction – statystyczne metody korekcji niejednorodności) czy GF-NUC (I-D Guided Filtering Non-Uniformity Correction – oparta o jednokierunkowy filtr GF – **metoda korekcji zakłóceń kolumn**, (GF – Guided Filter – filtr oszczędzający krawędzie obiektu).

VI. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, umiejętność przekonywania, poprawność redakcyjna)

Rozprawa zredagowana jest w sposób właściwy oraz posiada logiczny układ. Wyniki analiz teoretycznych i prac doświadczalnych przedstawione zostały w rozprawie w sposólb zrozumiały oraz jasny.

Uzyskane wyniki zostały przedstawione w sposób precyzyjny, z uwzględnieniem szczegółowych analiz, oraz porównań z istniejącymi metodami. W celu uzyskania dodatkowych walorów dydaktycznych oraz lepszej prezentacji wybranych zagadnień Autor zamieścił uzupełniające informacje w pięciu dodatkach oraz zamieścił słownik **skrótów i odnośników**.

Wyniki badań potwierdzają skuteczność zaproponowanego algorytmu w **korekcji niejednorodności termogramów**.

9

VII. Słabe strony rozprawy, jej główne wady

W trakcie analizy recenzowanej rozprawy doktorskiej wyłoniło się szereg istotnych uwag dotyczących zarówno warstwy językowej jak i merytorycznej pracy.

Uwagi te nie wpływają na zasadniczy pozytywny odbiór pracy, jednakże ich uwzględnienie pozwoliłoby na podniesienie profesjonalizmu opracowania.

Błędy językowe i redakcyjne

1. W tekście występują literówki (np. „możliwośc" zamiast „możliwość" „interesujacych" zamiast „interesujących", brak polskich znaków diakrytycznych (np. „z" zamiast „ż" oraz błędy interpunkcyjne, szczególnie w zdaniach złożonych. W rozdziale 1. Wstęp stwierdzono niekonsekwentne stosowanie przecinków przed spójnikami, co utrudnia interpretację zdań.
2. W części teoretycznej (rozdział 2.2.1) powtarzają się zwroty typu „jak wspomiano w pracy", bez konkretynych odwołań do równań lub sekcji, co osłabia klarowność wywodu. Ponadto w rozdziale 3.2.1 Autor używa terminu „przedziały przynależności danych"bez jednoznacznego zdefiniowania ich matematycznie.
3. We wzorze (2.5) (str. 27) stała Boltzmana oznaczona jest jak K (duże), natomiast w wyjaśnieniu symbolu oznaczona jest jak k (małe).
4. Wzory matematyczne dla jasności winny być zdefiniowane jako odwzorowania.
5. Na str. 73 w wierszu 12_d oraz na stronie 77 w wierszu 12^g pojawia się zwrot „wąskim gardłem"zapożyczony z języka potocznego.
6. Formatowanie spisu treści nie jest spójne. Do formatowania podrozdziału została użyta inna czcionka niż w pozostałej części pracy i spisu treści.
7. Uważam, że praca powinna być napisana w języku Tex. Zyskałaby na tym szata graficzna pracy.

Uwagi merytoryczne i metodologiczne

1. W pracy niesprecyzowano zużycia zasobów FPGA ani metryk PPS (piksele/(sekundę). Dane te umożliwiłyby porównanie z istniejącymi rozwiązaniami z tabeli 2.1.
2. Eksperymenty w rozdziale 4.7 pomijają badanie stabilności przy zmiennej temperaturze otoczenia oraz wilgotności. Jest to istotne w przypadku zastosowań przemysłowych.
3. W rozdziale 3.2.1 Autor nie wyjaśnia dlaczego wybrano metodę analizy histogramu zamiast np. **kwantylowej estymacji przedziałów**, mimo że ta druga radzi sobie lepiej z nietypowymi rozkładami danych.
4. Wyniki porównawcze z metodą CS-NUC (Constant Statistics Non-Uniformity Correction – statystyczne metody korekcji niejednorodności) (rozdział 4.7) oparte są na pojedynczym zestawie danych. Uważam, że w tym przypadku Autor mógłby uwzględnić **testy krzyżowe** lub **analizę wariancji**, co przyczyniłoby się do **wiarygodności wniosków**.

Uwagi ogólne:

1. Rozdział 2.4 („Rozwiązania sprzętowe") pomija analizę architektur układów VLSI (Very-Large-Scale Integration), mimo że są one kluczowe dla zrozumienia ograniczeń istniejących implementacji.
2. W całej pracy nie wspomina się o normach jakościowych (np. ISO18434-1) dotyczących systemów termowizyjnych. Ułatwiłoby to ocenę zgodności rozwiązania z wymaganiami rynkowymi.
3. Blisko 15% cytowań pochodzi z publikacji starszych niż 10 lat (np. z 2001 roku)

W ramach dyskusji proszę Doktoranta o wyjaśnienie i omówienie nastepujacych zagadnień:

- Czy rozważano możliwość zastosowania innego rozwiązania do korekcji zakłóceń kolumn?
  Opisane w rozdziale 4.3 badania skupiają się na walidacji jedynie propozycji Autora
- Jaka jest ilość danych procesowych, przetwarzanych podczas aktualizacji nastaw korekcyjnych pojedynczego mikrobolometru matrycy?
- Jaka jest wymagana przepustowość zastosowanej zewnętrznej pamięci RAM?
- Czy obraz z kamery jest kompresowany podczas przesyłania z implementacji sprzętowej do komputera?

Uwaga generalna: Wskazane usterki nie podważają wartości naukowej pracy i nie wpływają na pozytywny odbiór pracy jako całości.

VIII. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju

Rozprawa doktorska przedstawia kompleksowe podejście do problemu korekcji niejednorodności matryc bolometycznych, uwzględniając zarówno teoretyczne jak i praktyczne aspekty tego zagadnienia.

Wysoko oceniam przydatność recenzowanej rozprawy dla zastosowań technicznych. Praca jest szczególnie przydatna w projektowaniu nowoczesnych systemów obserwacyjnych do wielu zastosowań w szczególności do zastosowań specjalnych.

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój technologii obrazowania podczerwonego.

IX. Zaliczenie rozprawy do jednej z następujących kategorii

a) niespełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiazujące przepisy
b) wymagająca poprawek i ponownego recenzowania
c) spełniajaca wymagania
d) spełniająca wymagania z nadmiarem
e) **wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie**

9

Recenzowana rozprawa stanowi dowód na posiadanie przez mgr. inż. Jana Kwiatkowskiego szerokiej wiedzy teoretycznej z zakresu dyscypliny automatyki, elektroniki, elektrotechniki oraz teleinformatyki. Zaprezentowany proces badawczy wskazuje na wysoki poziom samodzielności doktoranta i jego obycia w środowisku naukowym (między innymi Doktorant brał udział jako wykonawca w 9-ciu projektach naukowo-badawczych).

Praca dowodzi szerokiej wiedzy teoretycznej Autora oraz wysokiego poziomu samodzielności w prowadzeniu badań naukowych i wdrażaniu nowatorskich rozwiązań. Opracowane i zweryfikowane eksperymentalne algorytmy charakteryzują się innowacyjnością oraz praktyczną użytecznością, a zakres i poziom treści istotnie przewyższają standardowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

W związku z powyższym uważam, że praca mgr. inż. Jana Kawiatkowskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim sformułowane w **Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki** i proszę Radę Dyscypliny o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Jednocześnie stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy za:

- **autorskie** opracowanie algorytmów **korekcji niejednorodności** w kontekście projektowania systemów kamer termowizyjnych pozbawionych mechanicznych systemów kalibracji
- **zweryfikowanie nowatorskiego algorytmu** udowodniając jego **unikalność** w kontekście aktualnego stanu wiedzy
- przeprowadzenie **testów opracowanego** algorytmu na wytworzonym stanowisku badawczym
- **wykonanie implementacji** w układzie programowalnym FPGA przetwarzającym strumień wideo pozyskiwany z niechłodzonej matrycy termowizyjnej o rozdzielczości 1024×768 pikseli
- przedstawienie **oryginalnych metod projektowania systemów termowizyjnych** o wysokiej rozdzielczości.

Jerzy Gawinecki

prof. zw. dr hab. n. mat. inż. Jerzy August Gawinecki