

Bartosz Hyla*, Joanna Koszyk, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka

Katedra Robotyki i Mechatroniki, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Zrobotyzowany system inspekcyjny do detekcji anomalii termicznych i akustycznych w obiektach technicznych

Robotic inspection system for detecting thermal and acoustic anomalies of technical objects

STRESZCZENIE

Diagnostyka techniczna odgrywa istotną rolę w zapobieganiu awariom i minimalizowaniu przestoju instalacji przemysłowych. Umożliwia to utrzymanie efektywności operacyjnej i ciągłości pracy maszyn. W niniejszej pracy proponujemy rozwiązanie techniczne bazujące na zrobotyzowanym automatycznym systemie detekcyjnym zdolnym do wykrywania anomalii w zakresie źródeł ciepła i dźwięku obiektów technicznych. Proponowane rozwiązanie bazuje na platformie mobilnej w postaci czworonożnego robota kroczącego wyposażonego w kamerę akustyczną, termowizyjną, czujnik LiDAR oraz zestaw kamer wizyjnych. System umożliwia tworzenie multimodalnych map otoczenia uzyskanych w wyniku rzutowania obrazowania termowizyjnego oraz akustycznego na chmurę punktów z czujnika LiDAR zainstalowanego na robocie. Przeprowadzone prace badawcze potwierdziły skuteczność działania systemu diagnostycznego w realizacji zadania automatycznej diagnostyki, opartej na pasywnych obserwacjach obiektu technicznego w trakcie pracy w warunkach laboratoryjnych. Rozwiązanie umożliwia dokonywanie monitorowania stanu technicznego maszyn niezbędnych do utrzymania ciągłości pracy.

Słowa kluczowe: tdiagnostyka techniczna, robot kroczący, inspekcja termiczna, inspekcja akustyczna, fuzja danych.

1. Wstęp

Ciągły rozwój i zaawansowanie techniczne instalacji przemysłowych w połączeniu z wymogami dotyczącymi wydajności i niezawodności pracy powodują, że diagnostyka maszyn jest nieodłącznym elementem pracy zakładów przemysłowych [1],[2]. Wykrycie nieprawidłowości w pracy urządzeń na wczesnym etapie pozwala na uniknięcie długotrwałych przestoju instalacji przemysłowych, a także wydłużenie żywotności maszyn, utrzymanie ciągłości działania i efektywności poprzez uniknięcie awarii, które mogłyby prowadzić do znacznego zwiększenia kosztów, a także spadku produktywności [3], [4]. Monitorowanie stanu technicznego urządzeń umożliwia uniknięcie potencjalnych problemów z wydajnością, a także pozwala na zapobieganie poważniejszym awariom, które mogą stanowić zagrożenia życia i zdrowia osób pracujących na terenie instalacji przemysłowych. Stosowanie klasycznych technik inspekcyjnych wymaga podjęcia prac diagnostycznych przez inspektora NDT (ang. Non-

ABSTRACT

Technical diagnostics play an important role in preventing failures and minimizing downtime of industrial installations. This allows for maintaining operational efficiency and continuity of machine operation. In this paper, we propose a technical solution based on an automated robotic detection system capable of detecting thermal and acoustic anomalies of technical objects. The proposed solution is based on a mobile platform in the form of a quadruped robot equipped with an acoustic camera, thermal camera, LiDAR sensor and a set of vision cameras. The system delivers multimodal maps of an environment obtained as a result of the projection of thermal and acoustic imaging onto a point cloud from the LiDAR sensor installed on the robot. Performed research confirmed the effectiveness of the diagnostic system in automatic diagnostics, based on passive observations of a technical object during operation in laboratory conditions. The solution enables monitoring of the technical condition of machines necessary to maintain continuity of work.

Keywords: technical diagnostics, quadruped robot, thermal inspection, acoustic inspection, data fusion.

Destructive Testing), co wiąże się z krótszymi przestojami niż w przypadku awarii oraz może zostać zaplanowane z wyprzedzeniem, jednak nie eliminuje problemu tymczasowego wyłączenia systemu z eksploatacji [5]. Alternatywnie możliwe do zastosowania są systemy SHM (ang. Structural Health Monitoring), które wymagają integracji czujników w systemie przemysłowym pozwalając na wczesną detekcję uszkodzeń na podstawie rejestrowanych sygnałów diagnostycznych w czasie rzeczywistym lub na żądanie [6]. Głównymi ograniczeniami w stosowaniu systemów SHM są ich wysoka cena wynikająca z braku możliwości korzystania z jednego systemu na wielu instalacjach oraz potencjalne problemy z ich niezawodnością wynikające z ciągłego charakteru pracy w długim okresie czasu i związane z tym kwestie fałszywych wskazań wynikających z degradacji czujników i/lub ich połączenia ze strukturą [7]. Rozwiązaniem pośrednim między badaniem NDT, wymagającym wyłączenia obiektów z eksploatacji, a zintegrowanym systemem SHM może być stosowanie bezkontaktowych, mobilnych i zrobotyzowanych systemów inspekcyjnych, które umożliwiają monitorowanie stanu technicznego systemu przemysłowego w trakcie pracy.

*Autor korespondencyjny.

E-mail: bhyla@agh.edu.pl

Zrobotyzowany system inspekcyjny nie podlega części ograniczeń odnośnie warunków pracy które mają zastosowanie w przypadku ludzi jak np. trudno dostępne przestrzenie, niebezpieczne środowisko chemiczne lub promieniotwórcze, niewystarczające oświetlenie itp. System taki nie wymaga również stosowania części procedur bezpieczeństwa obowiązujących w przypadku ludzi, co ułatwia wykonywanie zadań inspekcyjnych. W przypadku zastosowania bezkontaktowych czujników nie następuje również ingerencja w normalną pracę urządzenia poddawanego inspekcji w trakcie gromadzenia danych diagnostycznych [8], [9]. Zrobotyzowane systemy inspekcyjne charakteryzują się z reguły większą powtarzalnością pomiarów od pomiarów wykonywanych manualnie co pozwala na łatwiejszą archiwizację i śledzenie zmian obserwowanych parametrów w czasie. Dodatkowo, instalacje przemysłowe charakteryzują się często skomplikowaną przestrzenią do poruszania się zawierającą liczne progi oraz schody niemożliwe do pokonania przez roboty kołowe, co stwarza pole do implementacji w tym celu kroczących platform mobilnych dostosowanych do pracy w trudnym terenie [10].

Niniejsza praca skupia się na opracowaniu zrobotyzowanego systemu inspekcyjnego opartego na czworonożnym robocie kroczącym wyposażonym w system lokalizacji bazujący na czujnikach wizyjnych (zestawy kamer stereo i kamera 360°) i laserowych (LIDAR) oraz czujniki do rejestracji odpowiedzi akustycznych (kamera akustyczna) i termicznych (kamera termowizyjna) obiektów technicznych. Głównym wyzwaniem było przeprowadzenie fuzji rejestrowanych danych w celu stworzenia multimodalnej mapy diagnostycznej ułatwiającej podejmowanie decyzji diagnostycznych. Opracowaną koncepcję i prototyp systemu diagnostycznego poddano walidacji eksperymentalnej w warunkach laboratoryjnych. Zadanie polegało na monitorowaniu przestrzeni laboratoryjnej i wykryciu obiektu technicznego wykazującego podwyższone poziomy temperatury i odpowiedzi akustycznej oraz oznaczenie jego położenia w przestrzeni. W trakcie poruszania się i monitorowania przestrzeni pracy robot zatrzymywał się w oznaczonych punktach i dokonywał pomiarów rozkładu temperatury i dźwięku w swoim otoczeniu. Jednoczesna akwizycja danych z kamery akustycznej, kamery termowizyjnej, kamery 360° i oraz czujnika laserowego LiDAR umożliwiła oznaczenie w przestrzeni punktów podwyższonej względem otoczenia temperaturze i poziomowi dźwięku. W rzeczywistym zastosowaniu przemysłowym może to być przegrzewająca się na skutek niesprawności mechanicznej lub elektrycznej część maszyny, nieszczelność w układzie ciśnieniowym lub uruchomiony zawór bezpieczeństwa.

2. Platforma krocząca

Opracowany zrobotyzowany system inspekcyjny bazuje na czworonożnym robocie kroczącym Boston Dynamics SPOT wyposażonym w kamerę akustyczną Sorama L642, kamerę termowizyjną FLIR A70, a także kamerę 360° Ricoh Theta Z1 oraz czujnik laserowy LiDAR Ouster OS-1.

Platforma mobilna posiada dodatkowo pięć kamer stereowizyjnych zapewniających pełne pole widzenia wokół robota potrzebne do omijania przeszkód, co jest niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa zarówno dla robota, jak i dla jego otoczenia, zwłaszcza przy pracy w środowisku gdzie może dochodzić do interakcji robota z ludźmi. Platforma mobilna wraz ze zintegrowanymi czujnikami została pokazana na Rys. 1.

Badania zostały przeprowadzone w środowisku laboratoryjnym wewnątrz budynku. Na tym etapie badań założono, że obiekt testowy który powinien zostać wykryty przez system inspekcyjny, powinien umożliwić wygenerowanie na żądanie sygnatury cieplnej i akustycznej wyróżniającej się z tła jakie przyjmują te parametry w badanym pomieszczeniu. Obiektem takim był czajnik umieszczony na wysokości znajdującej się w polu widzenia kamer robota. Po włączeniu czajnika, gotująca się woda zapewniała wyraźną zmianę parametru cieplnego i akustycznego rejestrowanego przez system inspekcyjny, monitorujący ten obszar budynku. Środowisko pomiarowe oraz badany obiekt zostały pokazane na Rys. 2. Środowiska pracy robota obejmowały przestrzeń o wymiarach 23x4.5x3 m.

Badania zostały przeprowadzone w środowisku laboratoryjnym wewnątrz budynku. Na tym etapie badań założono, że obiekt testowy który powinien zostać wykryty przez system inspekcyjny, powinien umożliwić wygenerowanie na żądanie sygnatury cieplnej i akustycznej wyróżniającej się z tła jakie przyjmują te parametry w badanym pomieszczeniu. Obiektem takim był czajnik



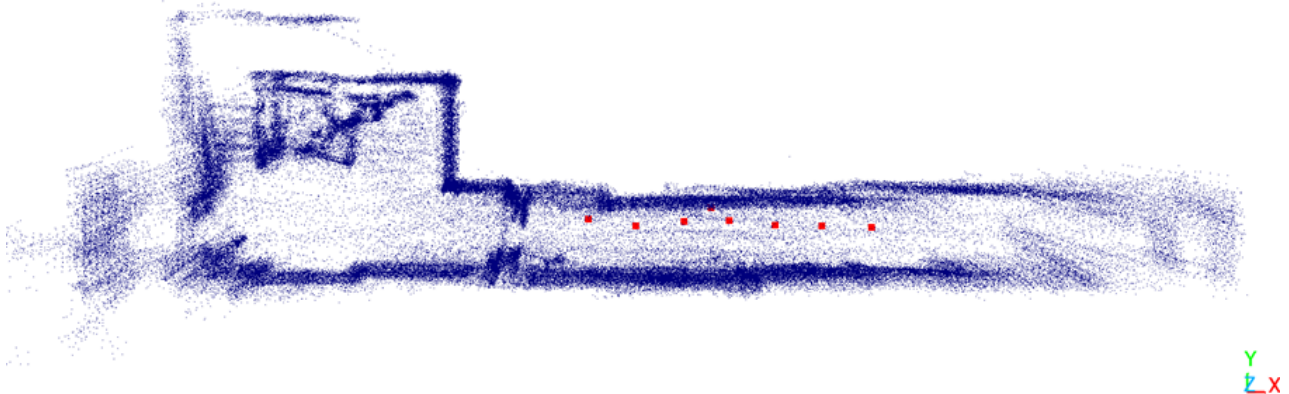
Rys. 1. Opracowany zrobotyzowany system inspekcyjny.
Fig. 1. Developed robotic inspection system.



(a)

(b)

Rys. 2. Środowisko pracy zrobotyzowanego systemu inspekcyjnego (a) oraz obiekt testowy (b)
Fig. 2. Working environment of the robotized inspection system (a) and the test object (b).



Rys. 3. Miejsca wykonywania pomiarów oznaczone czerwonymi punktami na mapie środowiska pracy robota wygenerowanej na bazie odczytów z czujnika LiDAR.

Fig. 3. Measurement locations are marked with red dots on the map of the robot working environment generated from LiDAR readings.

umieszczony na wysokości znajdującej się w polu widzenia kamer robota. Po włączeniu czajnika, gotująca się woda zapewniała wyraźną zmianę parametru cieplnego i akustycznego rejestrowanego przez system inspekcyjny, monitorujący ten obszar budynku. Środowisko pomiarowe oraz badany obiekt zostały pokazane na Rys 2. Środowiska pracy robota obejmowały przestrzeń o wymiarach 23x4.5x3 m.

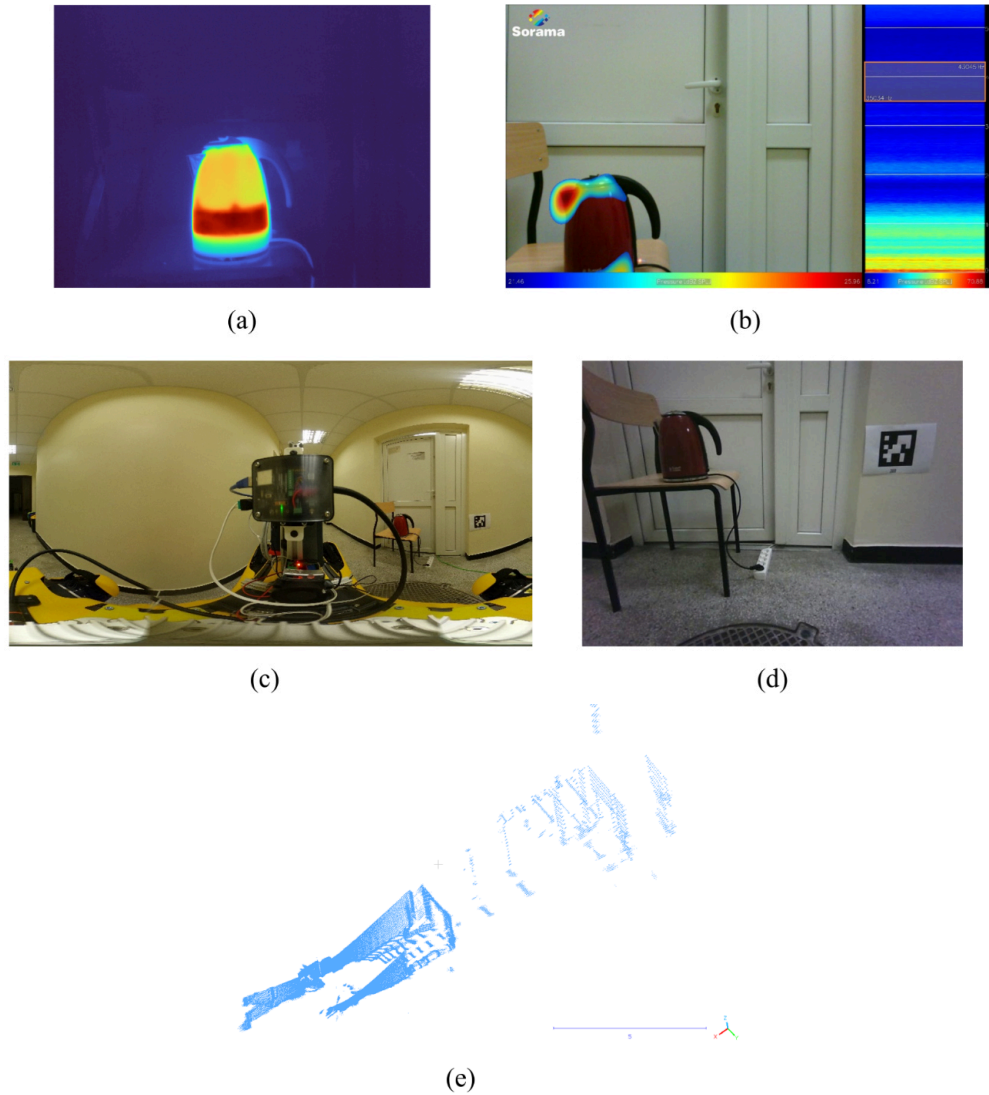
Dane zostały zebrane w 8 punktach pomiarowych oddalonych od siebie o około 1 metr. Dodatkowo zebrany został pomiar w lokalizacji robota naprzeciwko badanego obiektu. Miejsca pomiarów zostały oznaczone na mapie zebranej przez robota metodą LeGO-LOAM i są pokazane

na Rys 3.

Przykładowe odczyty z poszczególnych czujników w które wyposażony był opracowany zrobotyzowany system inspekcyjny pokazano na Rys 4.

3. Multimodalna mapa diagnostyczna

Obraz termowizyjny, akustyczny oraz zdjęcia ze źródeł wizyjnych zostały zrzutowane na chmurę punktów zebraną w danym punkcie pomiarowym. Poszczególne modalności obrazowania zostały naniesione poprzez podział skali kolorów na część wizyjną i na część wskazań diagnostycznych. W 24-bitowym kodowaniu kolorów chmury punktów poziom wizyjny został wyskalowany w przedziale od 0 do 204 na



Rys. 4. Przykładowe odczyty z czujników umieszczonych na robocie: (a) obraz z kamery termowizyjnej, (b) obraz z kamery akustycznej z naniesionymi lokalizacjami źródeł dźwięku i widmem mierzonych częstotliwości, (c) obraz z kamery 360°, (d) obraz z kamery wbudowanej robota od strony badanego obiektu (e) chmura punktów z czujnika LiDAR dla jednej chwili czasowej.

Fig. 4. Exemplary readings from the integrated sensors: (a) thermal camera image, (b) acoustic camera image with acoustic sources localization and sound spectrogram, (c) 360° camera image, (d) built-in robot camera facing the test object (e) single point cloud from the LiDAR sensor.

każdym z kanałów.

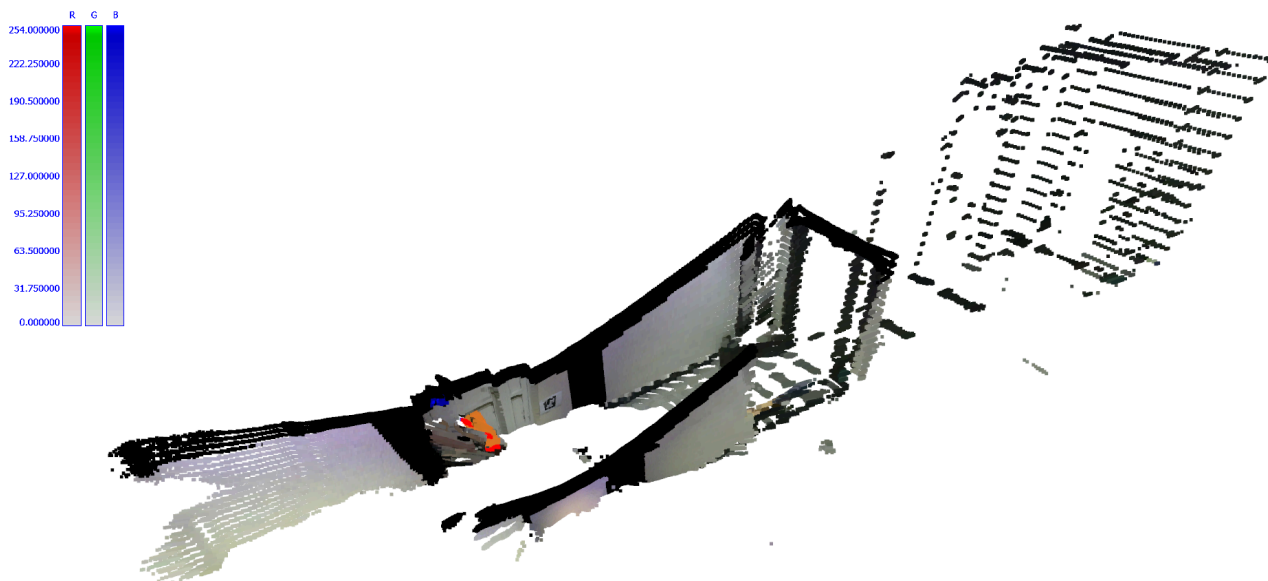
W celu otrzymania tej skali, kolory obrazu wizyjnego z wbudowanych kamer robota oraz kamery 360 zostały pomniejszone poprzez pomnożenie przez współczynnik 0.8. Wskazania diagnostyczne zostały określone w górnej granicy wartości skali kolorów od 205 do 255 z podziałem na poszczególne rodzaje wykryć, co pozwoliło na scharakteryzowanie ich w innym przedziale niż postać kolorów nie zawierających informacji o wskazaniach w taki sposób aby możliwe było łatwe ich rozróżnienie na wynikowej chmurze punktów. W celu rozróżnienia poszczególnych źródeł wskazań w górnym przedziale została wprowadzona klasyfikacja 3 rodzajów uszkodzeń. Wskazania termiczne zostały zakodowane poprzez oznaczenie kolorem pomarańczowym. Poziom alarmowy został określony na wartość przekraczającą 50°C i może być dostosowany do

badanego obiektu w zakresie od 0°C do 250°C.

Wskazania akustyczne oznaczone zostały na kanale kodującym kolor niebieski z dynamicznie określonym progiem alarmowym. Części wspólne, tj. obszary o przekraczającej zadany próg temperatury i poziomu dźwięku, interpretowane jako anormalna praca systemu, zostały oznaczone kolorem czerwonym. Tak niskopoziomowe kodowanie informacji diagnostycznej zapewnia wysoką wydajność obliczeniową. Na Rys 5. został pokazany efekt rzutowania w punkcie naprzeciwko badanego obiektu.

4. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiliśmy propozycję realizacji technicznej zrobotyzowanego systemu inspekcyjnego opartego na robocie kroczącym zdolnym do wykrywania



Rys. 5. Multimodalna mapa diagnostyczna uzyskana na podstawie fuzji danych rejestrowanych przez zrobotyzowany system inspekcyjny.

Fig. 5. Multimodal map of the environment calculated as a fusion of data collected by the robotic inspection system.

anomalii termicznych i akustycznych obiektów technicznych. Zestaw czujników składający się z kamery termowizyjnej, kamery akustycznej oraz zestawu kamer wizyjnych pozwala na pomiar niezależnych wielkości fizycznych co poprawia niezawodność detekcji, a w wyniku integracji z czujnikiem laserowym LiDAR, na uzyskanie jednoznacznej lokalizacji przestrzennej wykrytych wskazań diagnostycznych. Analiza danych z czujników pozwala zlokalizować źródło potencjalnego problemu, a także wyodrębnić wadliwy obiekt ze środowiska. Czworonożna konstrukcja zrobotyzowanej platformy mobilnej pozwala na wykonanie inspekcji w sposób powtarzalny, nawet w trudnym środowisku i uzyskanie precyzyjnych pomiarów w całym obszarze pracy, ze wskazaniem miejsc w których występuje podejrzenie awarii. Opracowana metoda nanoszenia wskazań na chmurę punktów wyróżnia się wizualnym odznaczeniem wykrytych obiektów na multimodalnej mapie, a także pozwala na oddzielenie wskazań diagnostycznych od obszarów normalnych za pomocą progowania wartości kolorów. W dalszym etapie rozwoju systemu planowane jest zapewnienie ciągłej akwizycji danych, raportowanie alarmów wraz z wysyłaniem zdjęć i lokalizacji do operatora oraz nanoszenie wskazań otrzymywanych lokalnie na globalną mapę diagnozowanej placówki.

5. Podziękowania

Badania sfinansowano w ramach grantu dziekańskiego Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej nr 16.16.130.942 - grant 16.

6. Literatura

- [1] S. Chu, J. Zhang, F. Liu, X. Kong, Z. Jiang, and Z. Mao, "Fault identification model of diesel engine based on mixed attention: Single-cylinder fault data driven whole-cylinder diagnosis," *Expert Systems with Applications*, vol. 255, p. 124769, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2024.124769.
- [2] J. Adamczyk, *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Warszawa, Bydgoszcz: Polskie Tow. Diagnostyki Technicznej; Inst. Technologii Eksploatacji PIB, 2004.
- [3] A. Valeev, A. Tokarev, and A. Zotov, "Diagnostics of Bearings of Industrial Machines Using Real-Time Strain Gauge Analysis," in *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia: IEEE, May 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111963.
- [4] T. Stepinski, T. Uhl, and W. Staszewski, *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications*. Hoboken: Wiley, 2013.
- [5] D. Chauveau, "Review of NDT and process monitoring techniques usable to produce high-quality parts by welding or additive manufacturing," *Weld World*, vol. 62, no. 5, pp. 1097–1118, Sep. 2018, doi: 10.1007/s40194-018-0609-3.
- [6] T. Barszcz, *System monitorowania i diagnostyki maszyn*. Kraków: Radom: Akademia Górniczo-Hutnicza. Katedra Robotyki i Mechatroniki; Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, 2006.
- [7] C. Mandache, M. Genest, and N. Mrad, "Considerations on Structural Health Monitoring Reliability," in *Proceedings of the International Workshop Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*, Montreal, QC, Canada, 2011.
- [8] P. Trybała, J. Blachowski, R. Błażej, and R. Zimroz, "Damage Detection Based on 3D Point Cloud Data Processing from Laser Scanning of Conveyor Belt Surface," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 1, p. 55, Dec. 2020, doi: 10.3390/rs13010055.
- [9] M. Siami, T. Barszcz, J. Wodecki, and R. Zimroz, "Design of an Infrared Image Processing Pipeline for Robotic Inspection of Conveyor Systems in Opencast Mining Sites," *Energies*, vol. 15, no. 18, p. 6771, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15186771.
- [10] P. Biswal and P. K. Mohanty, "Development of quadruped walking robots: A review," *Ain Shams Engineering Journal*,