

Nieniszczące zrobotyzowane badanie spawów metodą TOFD

Rafał Chojecki, Barbara Siemiątkowska, Jakub Michalski, Michał Wałęcki, Mateusz Wiśniowski
Materials Engineers Group Sp. z o.o.

Streszczenie: W artykule opisano zrobotyzowany system automatycznego badania jakości spawów. W nowoczesnym przemyśle petrochemicznym lub gazowym jednym z najistotniejszych czynników jest niezawodność i bezpieczeństwo działania instalacji. Uszkodzenia rurociągów lub reaktorów wiążą się z wysokimi kosztami przestojów i napraw lub, w skrajnych przypadkach, z możliwością katastrofy. Badania wykonywane są zazwyczaj przez wykwalifikowanych specjalistów, jednakże wspomaganie poprzez automatyzację tego procesu redukuje koszty i ryzyko popełnienia błędu oraz poprawia jakość wykonanego testu. System opisany w artykule opiera się na robocie mobilnym, służącym do przeprowadzania nieniszczących badań spoin techniką TOFD, opracowanym i wykonanym przez zespół B+R Materials Engineers Group z Warszawy. System umożliwia wykonywanie w pełni automatycznych pomiarów odcinków spawów. Robot wraz z głowicą pomiarową przemieszcza się, śledząc spoinę dzięki wykorzystaniu informacji z systemu wizyjnego. Rozwiązanie zostało zaimplementowane i przetestowane w rzeczywistym środowisku.

Słowa kluczowe: robotyka mobilna, nieniszczące badania materiału, system wizyjny, zdalne sterowanie, TOFD

1. Wstęp

W nowoczesnym przemyśle petrochemicznym lub gazowym jednym z najistotniejszych czynników jest niezawodność i bezpieczeństwo działania instalacji. Uszkodzenia rurociągów lub reaktorów wiążą się z wysokimi kosztami przestojów i napraw, lub w skrajnych przypadkach, z możliwością katastrofy. Aby zapobiegać takim zdarzeniom, instalacje podlegają częstym przeglądom technicznym, badane są m. in. połączenia spawane. Oprócz inspekcji wizualnej konieczne jest zbadanie, czy w połączeniach nie występują uszkodzenia niewidoczne, powstałe w skutek błędów wykonania połączenia lub w trakcie eksploatacji.

2. Metoda badania

Technika TOFD (ang. *Time of Flight Diffraction*) zalicza się do nieniszczących technik służących do wykrycia nieciągłości w materiale. Stosowana jest przede wszystkim w badaniu spoin, z dokładnym wymiarowaniem nieciągłości, z możliwością zdefiniowania ich typu. Dzięki komputerowej rejestracji danych pomiarowych metoda TOFD umożliwia pełną dokumentację wyników badań oraz ich analizowanie i weryfikację w dowolnym czasie [7].

Metodę TOFD wyróżniają następujące zalety:

- wysoka wykrywalność wad,

- mała liczba fałszywych wskazań,
- możliwość pomiaru geometrii nieciągłości w trzech płaszczyznach,
- wykonanie obrazu spoiny w osi, prostopadle do lica,
- komputerowa rejestracja wyników pozwalająca na ich analizę za pomocą właściwego oprogramowania,
- możliwość badania spoin o grubości do 300 mm,
- szybkość i dokładność badania,
- uniwersalność i mobilność metody niezależnie od grubości oraz typu złącza spawanego.

Technika ultradźwiękowych badań nieniszczących TOFD jest dedykowana szczególnie dla testów jakości spoin. Dzięki niej możliwe jest wykrycie i lokalizacja wad zarówno w materiale spawu, jak i w materiałach łączonych. Zasada pomiaru opiera się na odpowiedniej analizie sygnału zarejestrowanego z głowicy pomiarowej. Głowica składa się z nadajnika i odbiornika fal ultradźwiękowych. Aby poprawnie wykonać pomiar, ustawienie nadajnika i odbiornika powinno być symetryczne względem osi spawu. Głowica powinna być prowadzona wzdłuż spawu bardzo precyzyjnie, gdyż zależy od tego dokładność i jakość pomiaru.

Badania metodą TOFD wykonywane są przez doświadczonych i posiadających odpowiednie uprawnienia inspektorów na instalacji przemysłowej. Gdy pomiar dokonywany jest manualnie, odpowiedzialność za jakość znajduje się po stronie operatora. Często badane spoiny znajdują się w trudno dostępnych miejscach, przez co konieczne jest stosowanie rusztowań lub podnośników koszowych, co zwiększa koszty badania i jest czasochłonne. Dodatkowo praca na wysokości, z ciężkim i kosztownym wyposażeniem, jest niebezpieczna. z tych powodów zastosowanie robota mobilnego jest w pełni uzasadnione.

3. Budowa

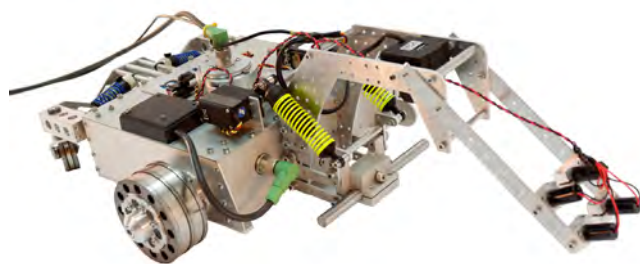
Głównym celem projektu było opracowanie modułowego robota mobilnego, przystosowanego do poruszania się po stalowych, pionowych powierzchniach instalacji przemysłowych, gdzie występują połączenia spawane. Zadaniem robota jest dokonanie zdalnej inspekcji spawów przez operatora znajdującego w odległości do 10 m od pojazdu. Inspekcja może mieć charakter wizualny lub wykorzystywać nieniszczące metody badania połączeń spawanych. Podczas opracowywania konstrukcji robota wykorzystano wieloletnie doświadczenia zespołu w projektowaniu i eksploatacji różnorodnych robotów mobilnych [1–6].

Podstawowymi założeniami projektu były:

- możliwość poruszania się po stalowych podłożach w orientacji pionowej i poziomej,
- prześwit 10–15 mm,
- modułowa budowa – możliwość instalowania dodatkowego wyposażenia,
- możliwość płynnego sterowania pojazdem w celu uzyskania optymalnej trajektorii prowadzenia głowic skanujących,
- duża siła przyciągania pojazdu do powierzchni,
- napęd elektryczny 24 V,
- sterowanie kablowe,
- wyposażenie w system wizyjny,
- wyposażenie w dodatkowe efektory do sterowania kamerą i podnoszenia głowicy skanującej,
- odporność na wodę.

Opracowany robot ma czterokołowe podwozie z kołami magnetycznymi. Dwa przednie koła są napędowe, a dwa pozostałe, zainstalowane na wahliwej belce, podpierają konstrukcję.

Robot mobilny składa się z kadłuba, tylnego zespołu podpierającego oraz wymiennych modułów wyposażenia sensorycznego.



Rys. 1. Robot z dodatkowym wyposażeniem sensorycznym
Fig. 1. Robot with additional sensors

Kadłub został wykonany z duraluminium. Znajdują się w nim napędy elektryczne w postaci dwóch silników elektrycznych ze zintegrowanymi przekładniami planetarnymi oraz mikroprocesorowy układ sterowania, składający się z głównego sterownika, stopnia mocy napędów oraz dwóch przetwornic DC. Kadłub został tak zaprojektowany, aby uzyskać dużą sztywność przy niskiej masie. W robocie zastosowano dwa silniki DC z przekładniami planetarnymi. Obydwa silniki wyposażone są w enkodery służące do pomiaru prędkości i przemieszczenia. Skręcanie robotem odbywa się przez różnicowanie prędkości obrotowej kół lewego i prawego silnika. Taki rodzaj napędu umożliwia zawracanie w miejscu, co jest istotne przy pracy na instalacjach przemysłowych.

Mikroprocesorowy sterownik robota został zamontowany nad silnikami. Aby zabezpieczyć go przed zakłóceniami elektromagnetycznymi, generowanymi przez silniki, zastosowano aluminiowy ekran. W przedniej części pojazdu zainstalowano stopień mocy napędów oraz przetwornice

DC-DC. Ustawienie elementów elektronicznych poddyktowane było optymalizacją chłodzenia podczas długotrwałej pracy.

Sterownik robota, poza sterowaniem napędami, obsługuje dodatkowe cyfrowe serwonapędy. Pierwszy z nich służy do poruszania kamerą wizyjną, w jaką został wyposażony robot, druga służy do podnoszenia i opuszczania głowicy skanującej. Kamera wizyjna została przymocowana do łożyskowanego statywu umożliwiającego jej obrót w zakresie 45° .

Robot wyposażony jest w następujące aktyatory:

- dwa silniki prądu stałego, napędzające koła robota za pośrednictwem przekładni,
 - dwa serwomechanizmy służące do regulacji pozycji ruchomej głowicy.
- Robot dysponuje również sensorami:
- enkodery inkrementalne zamontowane na osiach każdego z silników,
 - trójosiowy czujnik przyspieszenia,
 - kamera wraz z generatorem linii.

Podstawowym zadaniem niskopoziomowego sterownika robota jest sterowanie ruchem silników oraz serwomechanizmów na podstawie komend z komputera nadrzędnego bądź ręcznego pulpitu sterowniczego. Oczekuje się, że robot będzie łatwy i intuicyjny w obsłudze oraz odporny na błędy użytkownika. W tym celu w centralnym sterowniku robota zaimplementowano następujące mechanizmy:

Regulator prędkości silników

W podstawowym trybie pracy sterownika ruch robota zadawany jest z aplikacji na komputerze PC lub z panelu operatora za pomocą komendy zawierającej zadane prędkości dla każdego z kół. Aktualne prędkości są obliczane przez sterownik na podstawie cyklicznych pomiarów pozycji kół, dokonywanych przez enkodery. Obliczeniem sterowania, odpowiedniego do uzyskania zadanej prędkości, zajmuje się regulator PID.

Dzięki zastosowaniu regulatora prędkości operator ma do dyspozycji wygodny sposób manewrowania robotem – kierunek i wartość wychylenia joysticka na panelu odpowiada kierunkowi ruchu i prędkości robota. Dostępny jest również tryb pracy, w którym utrzymywana jest stała prędkość liniowa, a wychylenie joysticka wprowadza korektę toru ruchu. Zachowanie stałej prędkości liniowej jest istotne dla uzyskania wysokiej jakości prowadzonych pomiarów.

Regulator nachylenia toru ruchu

Innym sposobem sterowania jazdą robota jest zadanie kąta, pod jakim będzie nachylony jego tor ruchu. Ten sposób jest przydatny przy badaniu na pionowych powierzchniach długich spoin, które mają stały kąt nachylenia względem pionu. Dostępne są tryby jazdy z ustaloną prędkością w pionie, poziomie lub z utrzymaniem bieżącego kąta nachylenia toru. Wychylenie joysticka na panelu operatora w kierunku przód-tył odpowiada zadanej prędkości ruchu, a wychylenie na boki powoduje korektę toru. Pomiar aktualnego nachylenia toru ruchu odbywa się za pomocą czujnika przyspieszenia.

Regulator prędkości serwomechanizmów

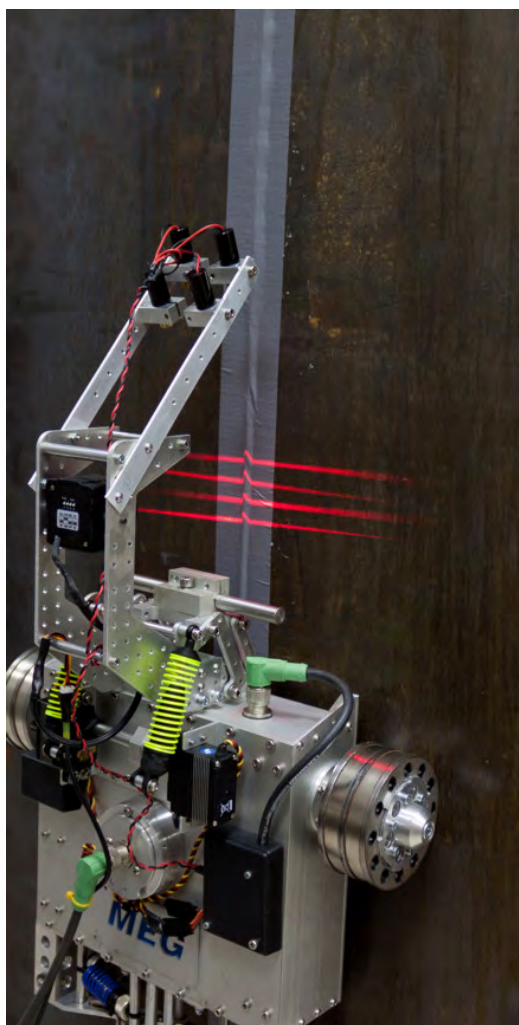
Dla wygody i precyzji opuszczania głowicy poruszające nią serwomechanizmy są sterowane przez wysłanie do ste-

rownika komendy zawierającej zadane prędkości. W efekcie kierunek i wartość wychylenia joysticka na panelu operatora odpowiada kierunkowi i prędkości ruchu serwomechanizmu.

Wykrywanie utraty komunikacji

Warunkiem sterowania ruchem robota jest regularne wysyłanie poleceń z częstotliwością nie mniejszą od ustalonego minimum. Zapobiega to zderzeniu z przeszkodą, spadnięciu z obiektu lub ucieczce robota w przypadku awarii panelu operatora, komputera sterującego lub uszkodzenia przewodu. W przypadku nieotrzymania polecenia w oczekiwanym czasie sterownik zatrzymuje robota i aktywnie utrzymuje go w stałej pozycji. Ponowne nawiązanie poprawnej komunikacji pozwala na wznowienie normalnej pracy robota.

W odpowiedzi na każde polecenie sterownik wysyła do panelu operatora lub komputera informacje o pozycji serwomechanizmów, kącie nachylenia toru jazdy oraz o przyroście pozycji kół robota. Możliwe jest obliczenie przez komputer aktualnej pozycji robota oraz zapis danych pomiarowych z jej uwzględnieniem.



Rys. 2. Robot na stanowisku laboratoryjnym
Fig. 2. Robot at laboratory tests

Sterownik robota składa się z dwóch modułów. Są to: 0904 – główny moduł sterujący, oraz 0905 – stopień mocy silników.

Główny moduł sterujący zbudowany jest z wykorzystaniem mikrokontrolera z rodziny STM32F103. Wybór tego mikrokontrolera został podyktowany następującymi względami:

- sprzętową obsługą enkoderów inkrementalnych o sygnale kwadraturowym,
- sprzętową generacją sygnału z modulacją szerokości impulsu (PWM) do sterowania silnikami i serwomechanizmami,
- obsługą standardów komunikacji I2C i UART,
- rozbudowanymi mechanizmami przerwań i bezpośredniego dostępu do pamięci (DMA) umożliwiającymi szybką komunikację oraz sprawne działanie zaimplementowanych regulatorów.

Moduł 0904 jest sterowany z ręcznego panelu przez interfejs szeregowy RS-232 za pośrednictwem konwertera poziomów logicznych MAX3232. Moduł obsługuje dwa serwomechanizmy modelarskie, steruje dwoma silnikami prądu stałego za pośrednictwem modułu 0905 oraz odczytuje przyrost pozycji silników z enkoderów inkrementalnych. Na module znajduje się ponadto trójosiowy akcelerometr LIS3LV02DQ, komunikujący się z mikrokontrolerem za pomocą magistrali I2C. Akcelerometr używany jest do określenia nachylenia robota.

Moduł 0905 służy do sterowania dwoma silnikami prądu stałego. Końcówka mocy zrealizowana jest przez dwa H-mostki zbudowane na tranzystorach MOS IRF540N, sterowanych przez układy IR2110. Moduł zarządzany jest przez mikrokontroler ATmega8, który umożliwia sterowanie za pomocą wybranego interfejsu (PWM, UART, poziom napięcia), zabezpiecza przed włączeniem obu tranzystorów w jednej gałęzi H-mostka oraz zabezpiecza moduł przed przegrzaniem, włączając wentylator lub zawieszając pracę modułu.

Panel sterowania składa się z przycisków, joysticka analogowego oraz wyświetlacza LCD. Elementy te obsługiwane są przez moduł 0703. Znajduje się na nim mikrokontroler ATmega16, który komunikuje się ze sterownikiem robota przez interfejs szeregowy RS-232 za pośrednictwem konwertera poziomów logicznych MAX3232.

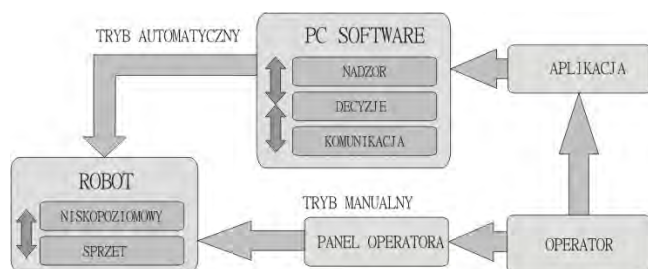
4. Sterowanie

Robot może pracować w jednym z pięciu trybów manualnych, ustawianych na panelu sterowania:

- jazda wolna - wychylenie joysticka steruje prędkością i kierunkiem jazdy,
- jazda ze stałą prędkością – wychylenie joysticka steruje tylko kierunkiem jazdy, przy zachowaniu stałej prędkości liniowej punktu leżącego w połowie odległości między kołami napędowymi robota,
- jazda pod ustalonym kątem – robot utrzymuje stałe nachylenie względem pionu,
- jazda w poziomie,
- jazda w pionie.

Realizacja jazdy z ustaloną prędkością jest możliwa dzięki zastosowaniu regulatora proporcjonalno-całkującego (PI). Pętla sprzężenia zwrotnego zamknięta jest w sterowniku 0904, do którego przesyłane są z panelu sterującego

wartości prędkości zadanej. Drugi regulator pracujący w sterowniku odpowiada za jazdę robota po linii o pożądanym nachyleniu względem pionu.



Rys. 3. Tryby pracy robota
Fig. 3. Robot control modes



Rys. 4. Zdjęcia spoin w różnych warunkach
Fig. 4. Images of different types of the welds

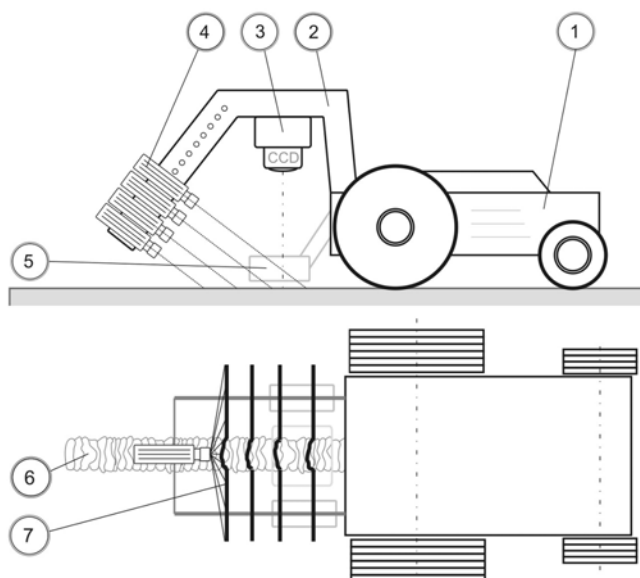
Robot ma również możliwość pracy w trybie **pół-automatycznym** oraz **automatycznym** (rys. 3). W obu trybach automatycznych wykorzystany jest system wizyjny robota.

Analiza obrazu spoiny jest utrudniona ze względu na różnorodność materiałów spawów, zanieczyszczenia oraz wpływ oświetlenia zewnętrznego (rys. 4). Z tego powodu w projekcie został użyty system projekcji światła strukturalnego, który umożliwia określenie położenia robota względem osi badanego spawu. System wizyjny składa się z układu kamery CCD (zamontowanej nad badanym obszarem spawu, o osi prostopadłej do badanej powierzchni) oraz odpowiednio zamontowanych laserowych generatorów linii (rys. 5). Zakres głębi ostrości został dobrany w sposób minimalizujący rozmycie w przypadku zakrzywionych powierzchni.

Laserowe generatory linii ustawione są w taki sposób, aby wyświetlać równoległe linie, prostopadłe do osi spawu. Odległość między liniami wynosi 10–20 mm. Pozwala to na określenie zarówno przesunięcia osi robota względem osi spawu, jak również jego orientację kątową. Sprzężenie wizyjne przekazuje obie informacje do układu sterującego ruchem robota. Obszar, w którym znajduje się głowica pomiarowa, kamera oraz generatory linii, musi być osłonięty przed wpływem światła zewnętrznego, które zakłóca funkcjonowanie systemu wizyjnego.

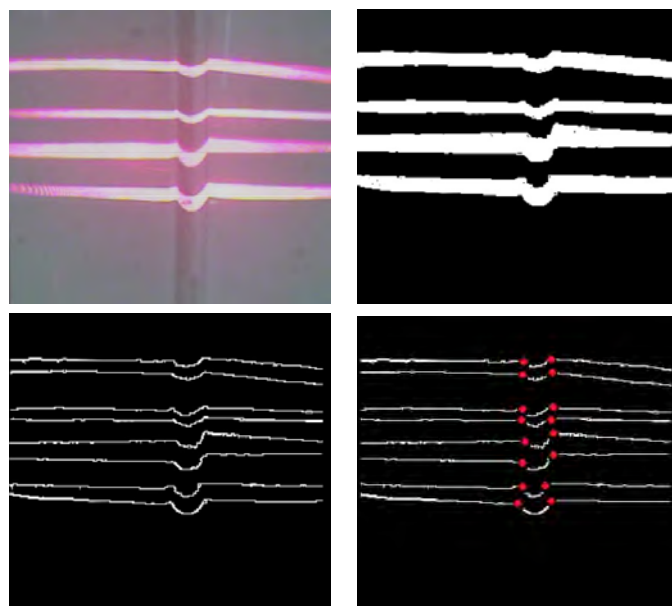
Celem funkcjonowania systemu automatycznej kontroli ruchu robota jest utrzymanie jego pozycji precyzyjnie nad spawem i podążanie wzdłuż niego, możliwie minimalizując odchyłkę. Zadanie sterowania jest specjalnym przypadkiem śledzenia określonej trajektorii [9, 10].

Układ automatycznego sterowania składa się z trzech warstw: komunikacyjnej, decyzyjnej oraz nadzorującej. Oprogramowanie niskopoziomowe (zaimplementowane w mikrokontrolerze) jest opracowane w taki sposób, aby



Rys. 5. Układ systemu wizyjnego: 1 – robot, 2 – rama przednia, 3 – kamera CCD, 4 – generatory linii, 5 – głowica pomiarowa, 6 – spaw, 7 – linie lasera

Fig. 5. Optical system configuration: 1 – robot, 2 – front frame, 3 – CCD camera, 4 – laser generators, 5 – measurement head, 6 – weld, 7 – laser lines



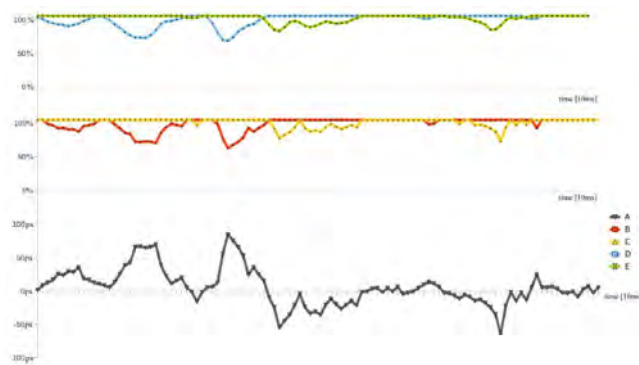
Rys. 6. Etapy analizy obrazu: A – obraz z kamery, B – adaptatywne progowanie, C – wykrywanie krawędzi, D – określanie pozycji spoiny

Fig. 6. Vision analysis stages: A – camera raw image, B – adaptive thresholding, C – edge detection, D – weld line estimation

umożliwić tryby pracy manualny i automatyczny oraz komunikację z oprogramowaniem wysokopoziomym, uruchomionym na komputerze klasy PC. Połączenie aplikacji z robotem pozwala na natychmiastową zmianę oraz odczyt wszystkich parametrów ruchu, obsługę wejść i wyjść sterownika (np. sterowanie głowicą pomiarową, kątem obrotu kamery lub wyświetlaniem linii lasera).

Warstwa decyzyjna składa się z algorytmów analizy obrazu systemu wykrywania pozycji spoiny oraz regula-

tora ruchu robota. Na podstawie danych dostarczonych do regulatora robot jest sterowany w taki sposób, aby podążał wzdłuż linii spoiny z zadaną prędkością. Zadanie sterowania nie jest trywialne, gdyż głowica pomiarowa jest przytwierdzona i nieruchoma względem robota, a metoda pozycjonowania jest dokonywana jedynie za pomocą ruchu całej platformy mobilnej. System wykorzystuje regulator rozmyty, głównie ze względu na jego stabilność oraz elastyczność sposobu sterowania w zależności od różnego typu spoin oraz ich ułożenia [8]. System jest przystosowany do prawidłowego funkcjonowania na różnych podłożach, dla zmiennych kształtów i szerokości spoin. Dodatkowo algorytm warstwy decyzyjnej zawiera parametry adaptacyjne, pozwalające na dopasowanie sterowania dla danych warunków oraz zdolność do predykcji toru spoiny w celu złagodzenia charakterystyki ruchu (w tym również redukcji zużycia energii)(rys. 7) oraz poprawy jakości badania.



Rys. 7. Przebiegi czasowe modułu decyzyjnego: A – odchyłka pozycji spoiny [piksele], B – prędkość lewego koła, C – prędkość prawego koła, D – prędkość lewego koła z predykcją, E – prędkość prawego koła z predykcją

Fig. 7. Decision program time-charts: A – weld position deviation [pixels], B – left motor speed, C – right motor speed, D – left motor speed with prediction, E – right motor speed with prediction



Rys. 8. Robot na instalacji przemysłowej

Fig. 8. Robot at industrial installation

Ostatnim modułem jest warstwa nadzorująca, która odpowiada za komunikację z operatorem oraz przejmując kontrolę nad poszczególnymi zadaniami systemu, takimi jak: analiza obrazu, sterowanie, adaptacja. Operator ma możliwość manualnego sterowania ruchem robota (np. za

pomocą joysticka) lub pracy w trybie półautomatycznym, gdzie użytkownik zadaje jedynie prędkość liniową robota, a system dba o jego prawidłowe ustawienie względem spoiny. Trzecim trybem jest automatyczny, pozwalający na w pełni autonomiczny przejazd odcinka spoiny. Robot z optymalną prędkością będzie przemieszczał się po jej trajektorii aż do wystąpienia jej skrzyżowania lub innej nietypowej sytuacji, w której operator podejmuje decyzję o kontynuacji.

Moduł nadrzędny ma również możliwość rejestracji parametrów spoiny, analizowanych przez system wizyjny oraz generowanie raportu końcowego.

5. Wnioski

Przedstawiono zrobotyzowany system automatycznego nieniszczącego badania spoin. Specjalna platforma mobilna wyposażona została w system wizyjny określający jej położenie i orientację względem badanej spoiny. System autonomicznego sterowania, oparty na regulatorze rozmytym ze sprzężeniem wizyjnym, zapewnia ruch robota wzdłuż żądanej trajektorii. Działanie systemu zostało przetestowane na istniejących spoinach. Planuje się modernizację konstrukcji w celu dopasowania systemu do szerszej gamy badanych spoin.

Bibliografia

1. Chojecki R.: *Minirobot mobilny NAVIGATOR 1*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 7/2003.
2. Chojecki R., Bartyś M., Olszewski M.: *Miniature Mobile Robots*, 5th Intern. Conf. MECHATRONICS'2004, „Elektronika” 35/2004, 8–9.
3. Chojecki R., Olszewski M., Pietrzak T., Fryc P., Wałęcki M.: *Budowa inspekcyjnego robota mobilnego Warrior I*, [w:] Tchoń K. (red.): *Progress in Robotics*, 2008.
4. Chojecki R., Olszewski M.: *A Mobile Robot for Laboratory Purposes and Its Applications*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, 55/2009, 3.
5. Chojecki R., Jankun F., Dębski K., Fryc P., Pietrzak T., Wałęcki M.: *Inspekcyjny robot mobilny Warrior I*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 1/2010.
6. Chojecki R., Jankun F., Dębski, Olszewski M.: *Przystosowanie pojazdu terenowego typu ATV do zdalnego sterowania*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 11/2010.
7. Brillouin C., Armitt T., Dupuis O.: *Inspection with Phased Arrays*, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008.
8. Gerla G.: *Fuzzy Logic Programming and fuzzy control*, „Studia Logica”, 79/2005, 231–254.
9. Kwolek B., T. Kapuscinski, M. Wysocki: *Vision-based implementation of feedback control of unicycle robots*, 1st Work. on Robot Motion and Control, 1999, 101-106.
10. Latombe J. C.: *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1991.

Non Destructive Mobile Robot System for Testing of Weld Joints

Abstract: This paper describes research towards the development of a robotic system for the automated welded joints testing. The tests are often carried out manually by skilled personnel. Automating the inspection process would reduce errors and associated costs. The system proposed in this paper is based on a mobile robot platform and is designed to carry ultrasonic sensors in order to scan welds for defects. The robot is equipped with vision system in order to detect the weld position. The fuzzy control system is used in order to control robot motion along the weld.

Keywords: mobile robotics, nondestructive testing, vision system, remote control, TOFD

mgr inż. Rafał Chojecki

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Współpracownik firmy Materials Engineers Group Sp. z o.o. w dziale B+R. Główną dziedziną pracy autora jest projektowanie konstrukcji oraz systemów zrobotyzowanych.

e-mail: r.chojecki@megroup.pl



dr hab. Barbara Siemiątkowska

Absolwentka Wydziału Matematyki, Mechaniki i Informatyki Uniwersytetu Warszawskiego. Współpracownik firmy Materials Engineers Group Sp. z o.o. w dziale B+R. Główną dziedziną pracy autorki jest projektowanie systemów wizyjnych oraz sterowania.

e-mail: b.siemiatkowska@mchtr.pw.edu.pl



dr inż. Jakub Michalski

Kierownik od spraw B+R w firmie Materials Engineers Group Sp. z o.o. Absolwent Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Pracę doktorską z dziedziny inżynierii materiałowej obronił w tej samej jednostce. Główne zainteresowania to implementacja innowacyjnych rozwiązań z dziedziny inżynierii materiałowej oraz badania materiałów do praktyki przemysłowej, automatyzacja technik badawczych.

e-mail: j.michalski@megroup.pl



mgr inż. Michał Wałęcki

Absolwent Wydziału Elektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Współpracownik firmy Materials Engineers Group Sp. z o.o. w dziale B+R. Główną dziedziną pracy autora jest projektowanie układów elektronicznych oraz systemów sterowania.

e-mail: m.walecki@megroup.pl



mgr inż. Mateusz Wiśniowski

Absolwent Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Współpracownik firmy Materials Engineers Group Sp. z o.o. w dziale B+R. Główną dziedziną pracy autora jest projektowanie oprogramowania oraz systemów nawigacji i autonomicznego sterowania.

e-mail: m.wisniowski@megroup.pl

