

Projekt oraz oprogramowanie stanowiska z robotem kolaboracyjnym z wykorzystaniem wirtualnej rzeczywistości

Magdalena Muszyńska, Paulina Pietruś

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów

Streszczenie: Kolaboracyjne roboty przemysłowe wychodzą naprzeciw nowoczesnemu podejściu do robotyzacji. Umożliwiają one współpracę z człowiekiem znajdującym się w obszarze pracy robota. W ramach artykułu wykonano projekt oraz oprogramowanie modelu stacji zrobotyzowanej umożliwiającej realizację współpracy człowiek–maszyna. Opracowano modele CAD stanowiska za pomocą oprogramowania Autodesk Inventor. Projekt stacji wykonano w środowisku RobotStudio z wykorzystaniem robota IRB 14000 YuMi. Oprogramowanie oparto na smart componentach oraz kodzie języka Rapid. Wykonano graficzny interfejs użytkownika, interaktywny z człowiekiem w wirtualnej rzeczywistości. Weryfikację oprogramowania przeprowadzono z udziałem operatora w wirtualnej rzeczywistości.

Słowa kluczowe: robot kolaboracyjny IRB 14000 YuMi, wirtualna rzeczywistość, człowiek–maszyna

1. Wprowadzenie

Manipulacyjne roboty przemysłowe to wielozadaniowe, programowalne maszyny sterowane automatycznie. Z reguły mają wiele stopni swobody, właściwości lokomocyjne lub manipulacyjne. Wykorzystywane są do ważnych zadań w przemyśle [1]. Najczęściej stosowane są roboty sześciopiętne. Roboty te znalazły zastosowanie przy wykonywaniu wielu procesów, jak spawanie, lakierowanie, transport, montaż, obróbka maszynowa oraz obsługa maszyn [2]. Z reguły procesy te są realizowane bez udziału człowieka w strefie pracy robota.

Kolaboracyjne roboty przemysłowe (ang. *cobot*) wychodzą naprzeciw nowoczesnemu podejściu do robotyzacji. Umożliwiają współpracę z człowiekiem znajdującym się w obszarze pracy robota. Aby kolaboracja była w pełni bezpieczna, system musi spełnić określone wymagania zgodnie z normą ISO/TS 15066. Roboty są wyposażane w zaawansowane systemy bezpieczeństwa i ograniczoną moc. Ich siła robocza musi być pod stałą kontrolą. Taka konfiguracja umożliwia realizację bezpiecznej współpracy między człowiekiem i robotem. Roboty współpracujące są stale rozwijającą się grupą robotów przemysłowych [2]. Szacuje się, że wartość rynku kobotów wzrośnie do około 12,3 miliarda dolarów w 2025 r. [3]. Podjęcie decyzji

o instalacji robota współpracującego zależy od wielu czynników. Nowoczesne techniki symulacji wykorzystujące wirtualną rzeczywistość pozwalają na lepszą wizualizację wdrażanego systemu. W zrealizowanej pracy przedstawiono rozwiązanie bazujące na robocie kolaboracyjnym IRB 14000 YuMi firmy ABB, który współpracuje z operatorem. Człowiek odpowiedzialny jest za podanie elementów robotowi, który zajmuje się ich wykrywaniem, pobraniem i montażem. Operator może kontrolować przebieg procesu za pomocą graficznego interfejsu użytkownika. Pracę zrealizowano w środowisku RobotStudio, dzięki zastosowaniu wirtualnej rzeczywistości umożliwiono wcielenie się w rolę operatora robota.

2. Analiza istniejących rozwiązań

Elementy wirtualnej rzeczywistości są stosowane w wielu dziedzinach robotyki. Ułatwiają programowanie off-line robotów pozwalając na realizację zupełnie nowych funkcji, z których korzystanie było ograniczone. Przeprowadzono szereg badań, analizę czasu wykonania określonych zadań polegających na sterowaniu robotem przez grupy osób, przy wykorzystaniu trzech różnych interfejsów teleoperacji. Pierwszym był interfejs wykorzystujący wirtualną rzeczywistość. Pozostałe składały się z monitora LCD oraz joysticka, przy czym jeden udostępnił obraz w trybie stereo, a drugi w trybie mono [5]. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, iż wydajność pracy operatorów przy użyciu interfejsu VR była około 1,8 razy większa niż przy użyciu interfejsu mono. Dodatkowo przeprowadzono ankiety, na podstawie których stwierdzono, że zastosowanie interfejsu stosującego techniki wirtualnej rzeczywistości zwiększa poziom obecności przestrzennej i oceny odległości [5].

Autor korespondujący:

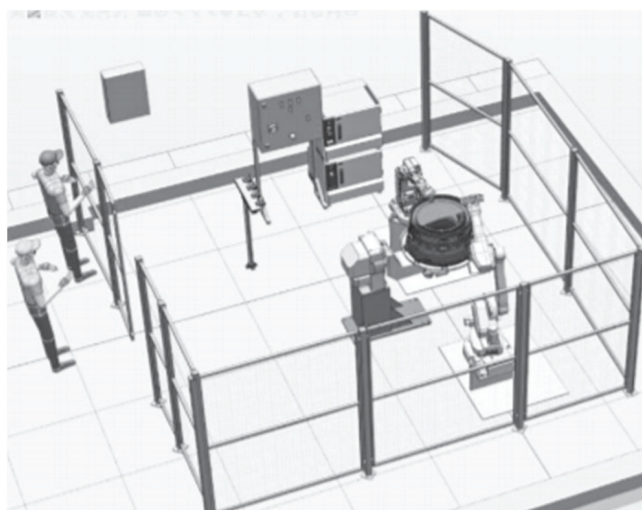
Paulina Pietruś, p.pietrus@prz.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 29.04.2021 r., przyjęty do druku 16.06.2021 r.

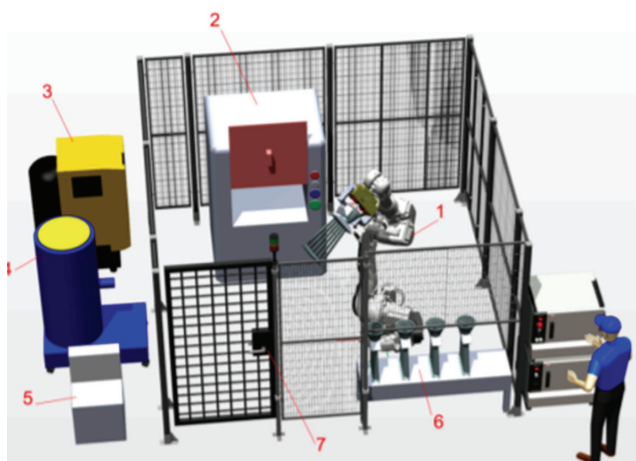


Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Model stacji zrobotyzowanej do obróbki elementów silników lotniczych [6]

Fig. 1. A model of a robotic station for processing aircraft engine components [6]



Rys. 2. Cyfrowy bliźniak stacji zrobotyzowanej [7]

Fig. 2. Digital twin of the robotic station [7]

Oprogramowanie RobotStudio umożliwia programowanie off-line robotów przemysłowych firmy ABB, modelowanie stacji, tworzenie mechanizmów i symulacji. Od 2017 r. oprogramowanie to umożliwia korzystanie z okularów do VR. Zwiększa to możliwości programu do tworzenia ścieżek w wirtualnej rzeczywistości, oddziaływanie na elementy stacji dzięki dostępnym kontrolerom ręcznym. Bardzo przydatną funkcją jest opcja Virtual Reality Meeting, która pozwala na dołączenie do symulacji stacji wielu osób. Operatorzy widzą siebie nawzajem w VR, mogą prowadzić interakcje przez dodawanie tekstu, rysowanie oraz wspólnie oddziaływać na stację. Funkcja ta jest szczególnie przydatna podczas współpracy inżynierów z różnych stron świata. Redukuje ograniczenia komunikacyjne, co do przedstawiania swoich wizji systemu. Przykładem wykorzystania możliwości VR jest zrobotyzowana stacja do obróbki elementów silników lotniczych (rys. 1) [6]. Stacja umożliwia realizację procesu obróbki odlewów dyfuzora. Za obróbkę odpowiedzialny jest robot ABB IRB 140 wraz z czteropozycyjną zmieniarą. W procesie wyróżniono trzy etapy – usunięcie nadmiaru, wykonanie fazy i szlifowanie powierzchni.

Podczas prowadzonych prac wykorzystano funkcję Virtual Reality Meeting ze względu na konieczność spotkań z inżynierami z USA oraz Kanady. Możliwości oprogramowania RobotStudio pozwalają na tworzenie ścieżek robota z wyko-

rzystaniem VR. Taka metoda może okazać się niezwykle skuteczna w przypadku trudnych do zaprogramowania ruchów, które wykonuje człowiek. Przykładem takiego procesu jest proces czyszczenia formy odlewniczej do produkcji aparatury sterującej w przemyśle lotniczym. Z reguły proces wykonywany jest przez człowieka, gdzie ważną rolę odgrywa czas trwania z uwagi na nasiąkanie formy i powstające uszkodzenia. W celu realizacji tego zadania zaprojektowano stanowisko zrobotyzowane wraz z cyfrowym bliźniakiem. Wykorzystano robot przemysłowy o udźwigu 80 kg. Wykonano model cyfrowej podwójnej miski odlewniczej i połączonej z nią ceramicznej formy odlewniczej. Do właściwego wykonania zadania przez robota zaprojektowano również urządzenie do chwytania miski odlewniczej wraz z cyfrowym bliźniakiem. Środowisko odpowiednio skonfigurowano, aby móc korzystać z możliwości wirtualnej rzeczywistości [7].

Właściwy etap polegał na akwizycji danych podczas wirtualnego czyszczenia formy przez człowieka. Miał on za zadanie wykonanie ruchów rzeczywistej formy połączonej z cyfrowym odpowiednikiem. Jednocześnie śledzono ruchy przez system sensoryczny zintegrowany z VR. Na podstawie zebranych danych stacja została zaprogramowana w trybie off-line.

W artykule przedstawiono rozwiązanie z użyciem robota kolaboracyjnego. W robotach kolaboracyjnych, oprócz standardowych konstrukcji, bardzo dobrym rozwiązaniem okazały się roboty dwuramienne, umożliwiające wykonywanie skomplikowanych operacji [2]. Robot dwuramienny YuMi (rys. 3) ma elastyczne ramiona oraz kamerę do lokalizacji części, każde z ramion składa się z siedmiu osi. Producent określa udźwig na poziomie 500 g oraz zasięg o wartości 559 mm. Robot zbudowany został do równoczesnej pracy z człowiekiem przy montażu małych części. Potrafi zatrzymać ruch w przeciągu milisekund, jeśli dojdzie do kolizji z operatorem. Narzędzie robota może poruszać się z maksymalną prędkością 1500 mm/s, zaś powtarzalność robota wynosi $\pm 0,02$ mm [8].

Firma Fanuc jest producentem najsilniejszego obecnie robota współpracującego na świecie. Kobot przedstawiony na rys. 4 ma sześć osi. Jego maksymalny zasięg wynosi 1813 mm, a dopuszczalne obciążenie równe jest 35 kg. Producent deklaruje powtarzalność na poziomie $\pm 0,08$ mm [9]. Podobnie jak inne konstrukcje robotów współpracujących, pokryty jest gumową osłoną, zapewniającą bezpieczeństwo operatora [10]. Robot zaprojektowany został z myślą współpracy z operatorem przy przenoszeniu ciężkich elementów.

Firma Universal Robots zajmuje się produkcją lekkich robotów kolaboracyjnych. W swojej ofercie ma cztery modele robotów. Roboty te charakteryzują się małą masą oraz sześcioma



Rys. 3. Robot dwuramienny YuMi firmy ABB [9]

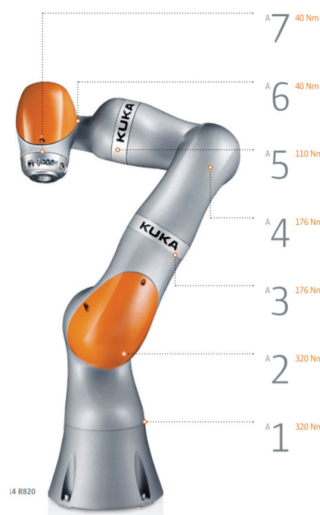
Fig. 3. YuMi two-arm robot from ABB [9]



Rys. 4. Robot współpracujący CR-35iA firmy Fanuc [10]
Fig. 4.. Fanuc collaborative robot CR-35iA [10]



Rys. 5. Robot kolaboracyjny UR3 firmy Universal Robots [12]
Fig. 5. Collaboration robot UR3 from Universal Robots [12]



Rys. 6. Robot kolaboracyjny LBR iiwa 14 R820 firmy Kuka [14]
Fig. 6. Collaboration robot LBR iiwa 14 R820 from Kuka [14]



Rys. 7. Robot kolaboracyjny MOTOMAN HC20DT IP67 firmy YASKAWA [16]
Fig. 7. Collaboration robot MOTOMAN HC20DT IP67 from YASKAWA [16]

stopniami swobody. Producent wskazuje, jak przesunąć ramię robotyczne do wskazanych punktów orientacyjnych lub wykonać to za pomocą kursorów na tablecie dotykowym. Wykorzystuje się je na liniach produkcyjnych, w magazynach czy przy obsłudze maszyn CNC. Przykładowy kobot firmy UR został przedstawiony na rys. 5.

Firma Kuka oferuje trzy modele kobotów LBR iiwa 7 R800, LBR iiwa 7 R800 CR oraz LBR iiwa 14 R820. Oznaczenie modelu zawiera w sobie udźwig oraz zasięg w milimetrach, poprzedzony literą „R”. W przypadku modelu LBR iiwa 14 R820 (rys. 6), producent wykazuje możliwość montażu na podłodze, ścianie oraz suficie. Maksymalny zasięg zgodnie z oznaczeniem wynosi 820 mm, natomiast udźwig jest równy 14 kg. Robot zbudowany jest z siedmiu osi, jego powtarzalność wynosi $\pm 0,1$ mm [13]. Kobot ma czujniki momentów przegubów, dzięki czemu bezbłędnie rozpoznaje objekty i w sposób natychmiastowy zmniejsza prędkość oraz siłę.

Firma Mitsubishi Electric oferuje kobotem sześciokościowy MELFA ASSISTA. Robot nie wymaga ręcznego programatora. Na swojej obudowie ma przyciski sterowania oraz diodę informującą o stanie pracy robota. Dzięki temu programowanie robota jest szybsze i prostsze w stosunku do innych rozwiązań robotów współpracujących. Kobot zgodnie z przyjętymi standardami rynku w bezpieczny sposób może dzielić przestrzeń roboczą z człowiekiem [15]. Robot ten może być montowany na podłodze oraz suficie. Jego zasięg wynosi 910 mm, a dopuszczalny udźwig wynosi 5 kg, warunkowo może zostać zwiększony do 5,5 kg.

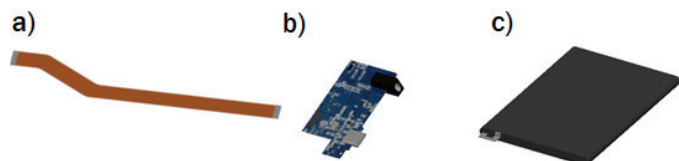
Firma YASKAWA ma w swojej ofercie kilka modeli kobotów, m.in. HC10, HC10DT, HC20XP. Symbol HC oznacza robota współpracującego z człowiekiem, natomiast wartość liczbową definiuje udźwig robota. Roboty mają sześć osi, zapewniają bezpieczeństwo operatora dzięki zastosowaniu technologii ograniczenia mocy i siły, która zapewnia zatrzymanie robota w przypadku kolizji z operatorem. Przystosowanie do pracy bez dodatkowych zabezpieczeń znacznie ogranicza koszty i czas instalacji. Roboty mogą być montowane na podłodze, ścianie oraz suficie [16]. Ich udźwig wynosi 10 kg lub 20 kg. Maksymalny zasięg roboczy w zależności od modelu waha się między 1200 mm oraz 1700 mm. Przykładem jest MOTOMAN

HC20DT IP67 (rys. 7), sześciokościowy robot współpracujący posiadający udźwig 20 kg.

3. Projekt oraz oprogramowanie stanowiska z robotem kolaboracyjnym

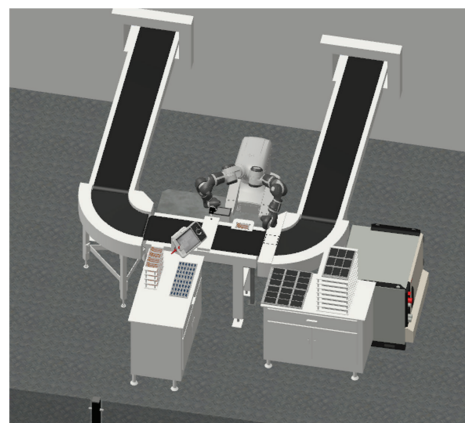
W artykule opisano projekt oraz oprogramowanie stacji zrobotyzowanej do montażu smartfonów. Część modeli została opracowana za pomocą oprogramowania Autodesk Inventor. Elementy te umieszczono w projekcie, część z nich wymagała późniejszego oprogramowania, aby możliwa była interakcja w VR. Zamodelowano chwytaki oraz elementy wchodzące w skład procesu montażowego. Z uwagi na wykonywanie precyzyjnych czynności montażowych zastosowano chwytaki podciśnieniowe z dwiema końcówkami chwytającymi o różnych przysawkach. Jedna przystosowana została do podnoszenia baterii smartfonu i płytki USB. Druga ma za zadanie podnosić taśmę połączeniową. Również obudowa chwytaka musi mieć łagodny kształt, aby nie stanowiła zagrożenia w przypadku kontaktu z człowiekiem. Jako przysawki do podnoszenia taśm wykorzystano ANVER C-F Flat Vacuum Cups C-F2-NBR, drugą przysawkę wybrano jako ANVER C-F15-NBR o dopuszczalnym obciążeniu równym 0,5 kg. W ramach realizacji pracy wykonano modele CAD części składowych smartfonu takich jak: płyta główna, bateria, panel przycisków bocznych, płytka USB, przednia obudowa, taśma połączeniowa płyty głównej i wyświetlacza, taśma połączeniowa płyty USB oraz płyty głównej. Procesowi montażowemu podlega płytka USB, bateria oraz taśma połączeniowa płyty głównej oraz płytki USB (rys. 8).

Operator ma za zadanie pobrać płytkę z zasobnika, a następnie umieścić ją w odpowiedniej strefie odbioru elementów. Aby właściwie zasymulować stanowisko, zamodelowano stół ze stelażem. Na stole umieszczono formy, z których operator może pobierać płytki USB, a następnie przekazywać je do montażu. Głównym elementem stanowiska jest przenośnik taśmowy wykonany z wykorzystaniem dodatku dostępnego w oprogramowaniu RobotStudio (rys. 9). Ma on kształt litery U i odpowiada za transport elementów wchodzących do procesu montażowego oraz wychodzących z niego.

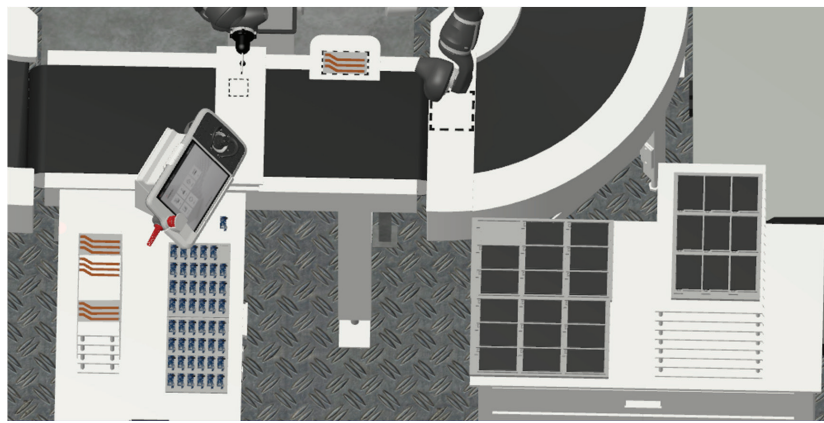


Rys. 8. Elementy wchodzące w skład procesu montażowego: a) taśma połączeniowa płyty USB oraz płyty głównej, b) płyta USB, c) bateria
 Fig. 8. Elements included in the assembly process: a) tape connecting the USB board and the motherboard, b) USB board, c) battery

mentu systemu przenośników taśmowych oznaczonym nazwą „zakonczo”. Sygnał ten wykorzystywany jest do wznowienia ruchu przenośnika po zakończonym procesie montażu. Liczbą 3 oznaczono smart component odpowiadający za wykrywanie płytki USB w polu odbioru płytki przez robota. Smart component wykorzystuje cztery sygnały. Sygnał wejściowy „log_jedynka” to wartość binarna otrzymana z przetrzutnika typu SR (oznaczonego liczbą 11), odpowiada za aktywację czujników. Wejście „set” ma za zadanie zaktualizowanie wartości zmiennych pozycji i orientacji. Połączono je z wyjściem kontro-



Rys. 9. Widok stanowiska z modelem przenośnika taśmowego
 Fig. 9. View of the stand with the model of the belt conveyor



Rys. 10. Widok stanowiska ze strefami poboru elementów do montażu
 Fig. 10. View of the stand with the zones of consumption of elements for assembly

Do systemu przenośników zamodelowano trzy płyty trzymające o różnych wymiarach, z których robot pobiera elementy. Na rysunku 10 przedstawiono widok stanowiska z góry, na którym widać trzy strefy pobierania elementów do montażu.

Stanowisko wyposażono również w OmniCore FlexPendant wraz z uchwytem (rys. 11). Modele tych elementów znajdują się w środowisku RobotStudio. Pozwalają zasymulować stanowisko do współpracy człowieka z robotem kolaboracyjnym.

Oprogramowanie RobotStudio umożliwia projektowanie stanowiska związane z odpowiednim ustawieniem modeli oraz programowanie robotów wraz z symulacją stanowiska w trybie off-line. Program pozwala na całkowite odwzorowanie kontrolera robota z wykorzystaniem technologii VirtualRobot firmy ABB [17]. Projektowanie stacji w RobotStudio oprócz ustawienia modeli wymaga ich właściwej konfiguracji. Część opcji związana jest z kwestiami wizualnymi, a część ściśle oddziałuje na właściwą symulację. W pracy skonfigurowano właściwości fizyczne obiektu, aby operator mógł nimi manipulować w VR. Narzędzia graficzne pozwalają na włączenie cieni, projektowanie światła, narzucenie tekstur na obiekty, aby zwiększyć odwzorowanie rzeczywistości. Oprogramowanie odpowiadające za realizację działania stacji wykonane zostało za pomocą logiki stacji (rys. 12) oraz kodu programu kontrolera robota napisanego w języku Rapid. Działanie określonych elementów stacji warunkowane jest przez smart componenty. Wymieniają one sygnały między sobą oraz kontrolerem.

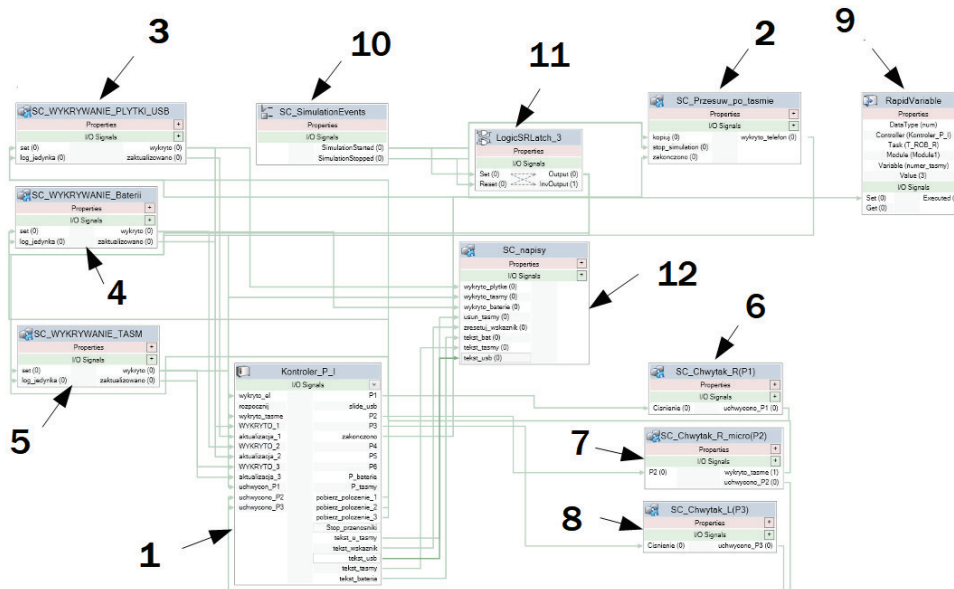
Liczbą 1 oznaczono blok odpowiadający za parametry kontrolera robota. Ma on wejścia i wyjścia cyfrowe, którymi komunikuje się ze smart componentami. Smart component odpowiadający za system przenośników taśmowych (oznaczony liczbą 2) ma trzy wejścia oraz jedno wyjście. Wejścia „kopiuj” i „stop_simulation” połączono odpowiednio z wyjściami „SimulationStarted” oraz „SimulationStopped” smart componentu SimulationEvents (oznaczonego liczbą 10). Informacja o rozpoczęciu symulacji jest wykorzystywana do utworzenia pierwszego smartfonu na taśmie przenośnika. Zakończenie symulacji powoduje wyczyszczenie bloków pamięci. Wyjście „zakonczo” kontrolera robota komunikuje się z wejściem smart compo-



Rys. 11. Model OmniCore FlexPendant
 Fig. 11. OmniCore FlexPendant model

lera „pobierz_polozenie_1”. Smart component ma dwa wyjścia „wykryto” oraz „zaktualizowano”. Służą one odpowiednio do informowania o wykryciu płytki USB oraz o skutecznym zaktualizowaniu wartości zmiennych pozycji i orientacji. Wyjście „zaktualizowano” połączono z wejściem kontrolera „aktualizacja_1”, natomiast wyjście „wykryto” połączono z wejściem kontrolera „Wykryto_1”. Smart componenty oznaczone liczbami 4 i 5 opracowano w sposób analogiczny. Bloki oznaczone liczbami 6–8 odpowiadają za chwytanie elementów. Mają po jednym wejściu i wyjściu.

Przeanalizujemy działanie bloku nr 6. Wejście „P1” połączono z wyjściem „P1” kontrolera, który informuje smart component o żądaniu uchwycenia obiektu. Wyjście „uchwycono_P1” skomunikowano z odpowiednim wejściem kontrolera, informuje ono o poprawnym uchwyceniu obiektu. Informację tę wykorzystano do kontroli właściwego pobrania elementu. Blok nr 12 odpowiada za wyświetlanie napisów, ma cztery wejścia, które połączono z odpowiednimi wyjściami kontrolera. Wymuszenie stanu aktywnego odpowiedniego wejścia wyświetli napis w trakcie symulacji z zadaniem, jakie ma wykonać operator. Blok nr 9 odpowiedzialny jest za zmianę wartości zmiennej numerycznej. Wejście „Set” bloku połączono z wyjściem „Simu-



Rys. 12. Schemat logiki stacji w RobotStudio

Fig. 12. Station logic diagram in RobotStudio

lutionStarted” smart componentu SimulationEvents. Dzięki temu każdorazowo przy rozpoczęciu symulacji wskaźnik liczby taśm zostanie nadpisany wartością 3. Prawidłowe uchwycenie obiektu wymaga otrzymania sygnału z kontrolera robota o rozpoczęciu chwytu. Rolę sygnału informującego pełni wyjście cyfrowe „P1” kontrolera robota. Sensor liniowy wskazuje obiekt, który będzie poddany manipulacji, zaś obiekt odniesienia, do którego będzie on przyłączany ustawiono na chwytak. Dzięki takiemu rozwiązaniu umożliwiono kontrolę prawidłowości uchwycenia obiektu. Sposób ten uniemożliwia robotowi kontynuowanie ruchu po ścieżce bez obiektu, który ma zostać poddany procesowi montażowemu. Informację o elemencie, który ma zostać odczepiony blok pobiera z bloku Attacher. Wykonanie przebiega z zachowaniem pozycji obiektu. Zanegowany sygnał „P1” połączono również z wejściem „Reset” przerzutnika SR. Oznacza to, iż puszczenie obiektu spowoduje zresetowanie znacznika prawidłowego uchwycenia. Po upuszczeniu obiektu, powinien zostać on zaczepiony do modelu smartfona. W dalszej części przedstawiono wycinek programu w języku Rapid odpowiadający za uchwycenie obiektu:

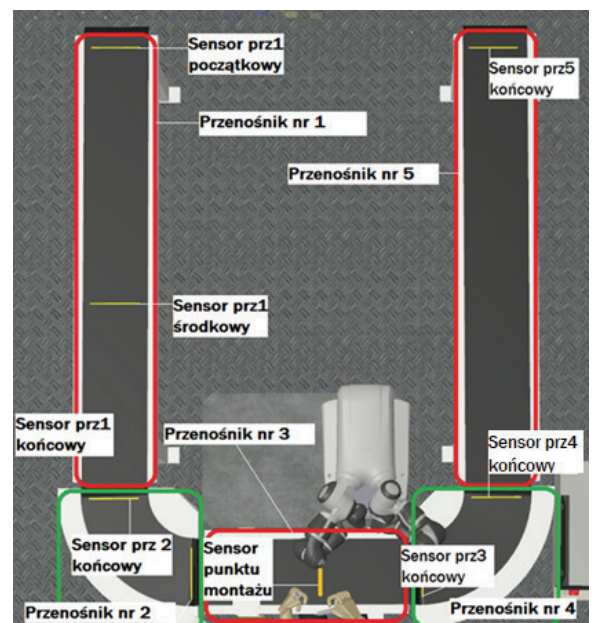
```

MoveJ p_obl_usb, predkosc_dojazdu, fine, Chwytek_podcisnieniowy\WObj:=Workobject_R;
!instrukcja_dojazdu_do_punktu_odbioru
WaitRob\InPos; !Oczekiwanie_na_osiagniecie_pozycji_przez_robota
SetDO P1,1; !Ustawienie_stanu_wysokiego_na_wyjsciu_P1
WaitTime 0.2; !oczekiwanie_0.2[s]
IF uchwycen_P1=0 THEN !jezeli_nie_uchwyciono_obiektu
SetDO P1,0; !zresetuj_sygnal_P1
MoveJ
p_odbioru_usb, predkosc_ruchu, z20, Chwytek_podcisnieniowy\WObj:=Workobject_R;
!cofnij_robota_do_poprzedniej_pozycji
GOTO sprawdz_ponownie_usb; !rozpocznij_program_od_ponownego_sprawdzenia
obecnosci_obiektu_w_strefie
ENDIF

```

Stacja ma łącznie trzy smart componenty do chwytania obiektów. Struktura każdego z nich jest identyczna. SC_Chwytek_R(P1) odpowiada za chwytanie płytek USB za pomocą większej przyssawki przez prawe ramię robota. SC_Chwytek_R(P2) odpowiada za chwytanie taśmy przyłączeniowej za pomocą małej przyssawki przez prawe ramię robota. SC_Chwytek_L(P3) odpowiada za chwytanie baterii za pomocą większej

przyssawki przez lewe ramię robota. Stacja została wyposażona również w smart component odpowiadający za wyświetlanie znaczników tekstowych. Zastosowanie napisów wyświetlanych w trakcie symulacji ma na celu łatwiejszą orientację w środowisku VR przez operatora. Aby określić pozycje obiektów w strefach odbioru, w trakcie symulacji przyjęto rozwiązanie, w którym operator nie informuje robota o umieszczeniu elementu w strefie odbioru. Robot sam rozpoznaje obecność obiektu za pomocą czujnika.



Rys. 13. Schemat systemu przenośników taśmowych

Fig. 13. Diagram of the system of belt conveyors

Właściwe funkcjonowanie symulacji wymaga wystąpienia ruchu na przenośnikach taśmowych. Do sterowania systemem zastosowano smart component SC_Przesuw_po_tasmie. Istnieje kilka sposobów manipulacji elementami w środowisku RobotStudio. W pracy zdecydowano się na wykorzystanie połączonych ze sobą pięciu przenośników taśmowych. Odpowiednie bloki wykonują ruch liniowy elementów na trzech przenośnikach, na pozostałych dwóch ruch odbywa się krzywoliniowo. Schemat systemu przenośników, z oznaczeniem najważniejszych elementów, przedstawiono na rys. 13.

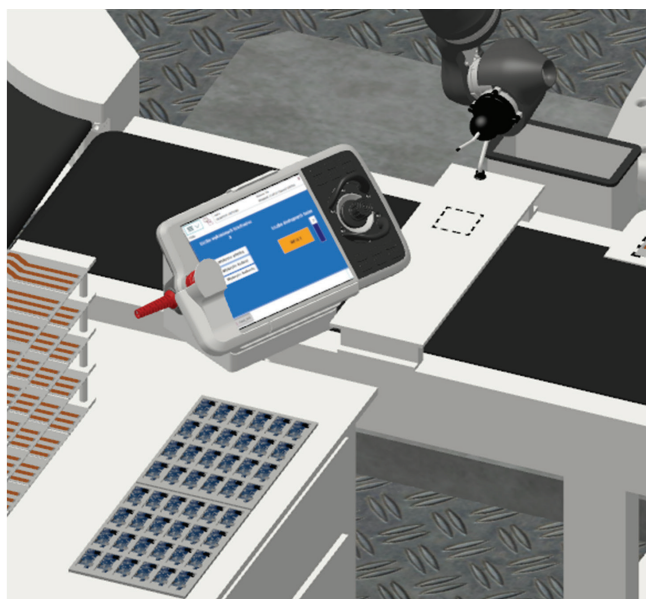
Po pojawieniu się sygnału rozpoczęcia symulacji, tworzona jest kopia smartfona oraz podkładki. Elementy te poruszają się po przenośniku aż dotrą do punktu montażu, gdzie następuje zatrzymanie ruchu. Robot wznawia ruch po wykonaniu

czynności montażowych. Elementy poruszają się aż do końca przenośnika, gdzie ich ruch jest zatrzymany.

4. Projekt oraz oprogramowanie interfejsu operatora

W zaprojektowanym stanowisku robot współpracujący ze specyfiki swojego działania wymaga komunikacji z operatorem. Może ona odbywać się przez Flexpendant. Jednak szybszym i bardziej czytelnym sposobem jest użycie interfejsu operatora. RobotStudio dzięki narzędziu ScreenMaker umożliwia tworzenie graficznego interfejsu użytkownika. Aplikacja może składać się z wielu ekranów, każdy z nich może zawierać przyciski, zdjęcia, pola tekstowe, komponenty graficzne czy menu.

W projekcie w skład interfejsu wchodzi trzy znaczniki informujące o wykryciu elementów w strefach odbioru, licznik wykonanych smartfonów, licznik taśm wraz z wizualnym wskaźnikiem paska stanu oraz przycisk resetujący przechowywaną liczbę dostępnych taśm do jej maksymalnej wartości.



Rys. 14. Widok panelu na stanowisku w trakcie pracy
Fig. 14. View of the panel on the stand during work

Wartości przechowywane są w zmiennych numerycznych języka Rapid. Operator w trakcie trwania symulacji ma dostęp do panelu i może na niego oddziaływać. Widok panelu na stanowisku w trakcie symulacji przedstawiono na rys. 14. Opracowany ekran bardzo dobrze wpasowuje się w pobrany model CAD. Umiejscowiono go w taki sposób, aby operator mógł z niego korzystać nie przerywając kontroli wykonywanego procesu.

5. Programowanie skoordynowanych ruchów ramion robota Yumi

Roboty firmy ABB mogą wykonywać skoordynowane ruchy dzięki opcji MultiMove. Opcja ta pozwala jednemu kontrolerowi na sterowanie kilkoma robotami. Jeden kontroler pozwala na obsługę sześciu zadań równocześnie. Funkcja MultiMove wykorzystywana jest do realizacji skoordynowanych ruchów kilku robotów poruszających się w jednym układzie współrzędnych, poruszania obiektem przez jednego robota lub koordynacji kilku robotów np. w celu podnoszenia ciężkich przedmiotów [20]. Programowanie robotów wykonujących ruchy skoordynowane wymaga użycia komend na początku wystąpienia ruchu oraz w momencie zakończenia. Ruch skoordynowany rozpoczyna się od użycia komendy SyncMoveOn, natomiast polecenie SyncMoveOff kończy synchronizację. Bardzo istotnym elementem jest konieczność zachowania równej liczby komend ruchu między znacznikami dla każdego z robotów. Numery ID instrukcji ruchu muszą się pokrywać.

W pracy zastosowano ruchy zsynchronizowane do pobierania taśmy przyłączeniowej przez IRB 14000 YuMi. Zastosowano metodę koordynacji ruchów wielu robotów. Prawe ramię robota ma nieruchomy układ współrzędnych – Workobject związany z przenośnikiem taśmowym. Natomiast lewe ramię ma układ współrzędnych – Workobject związany z prawym ramieniem robota.

6. Symulacja i weryfikacja oprogramowania

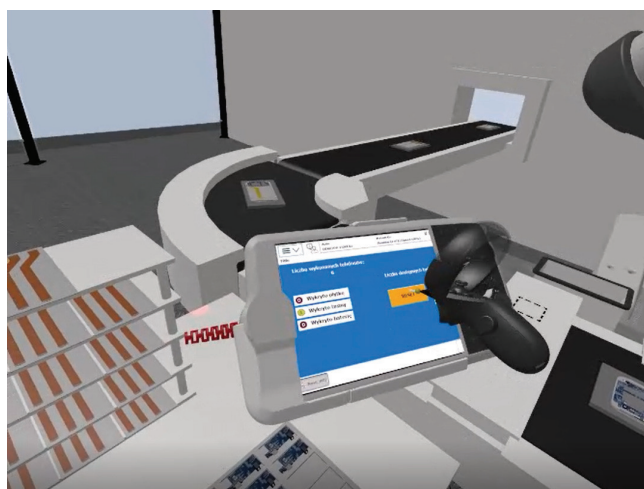
Oprogramowanie modelu stacji zrobotyzowanej składa się z wielu elementów. Opracowane zostało z myślą użycia tech-



Rys. 15. Testy oprogramowania z udziałem operatora z wykorzystaniem VR
Fig. 15. Software tests with the participation of the operator using VR

nik wirtualnej rzeczywistości, nie jest więc możliwe korzystanie w pełni z symulacji bez sprzętu VR. Testy oprogramowania przeprowadzono w laboratorium Politechniki Rzeszowskiej. Na rys. 15 przedstawiono obraz symulacji oraz operatora w trakcie trwania procesu montażowego.

Operator w trakcie symulacji korzystając z gogli i kontrolerów ręcznych oddziałuje na elementy symulacji. Przeprowadzono testy oprogramowania polegające na wcieleniu się w rolę operatora. Główna interakcja między człowiekiem a maszyną odbywa się poprzez przenoszenie elementów. Realizowane jest to dzięki kontrolerom ręcznym. Należy wybrać opcję chwytania obiektów i za pomocą kontrolera ręcznego można manipulować obiektami, które mają właściwość fizyczną „Kinematic” lub „Dynamic”. Nie ma konieczności zbliżenia kontrolera idealnie do punktu odbioru. Kierując kontroler w okolice obiektu, zostaje wybrany automatycznie najbliższy element spełniający kryteria. Następnie trzymając przycisk kontrolera, operator musi odłożyć element w strefie odbioru. Obiekt może być ustawiony pod niewielkim kątem, robot zmienia orientację narzędzia o obliczony kąt. Zgodnie z założeniem programu, robot nie podniesie elementu do czasu, gdy operator przestanie nim poruszać.



Rys. 16. Interakcja z panelem operatora w wirtualnej rzeczywistości
Fig. 16. Interaction with the operator's panel in virtual reality

Testy panelu operatora wykazały, iż zgodnie z zaleceniem producenta, okno Virtual FlexPendant musi być otwarte, aby możliwe było korzystanie z niego w symulacji. Człowiek będąc w VR może kontrolerem oddziaływać na panel. W momencie zbliżenia kontrolera do interaktywnego elementu aplikacji GUI, pojawia się wskaźnik potwierdzający interaktywność obiektu. W trakcie testów potwierdzono poprawność działania wskaźników.

Podczas symulacji operator umieszcza zużyte zestawy taśm w pojemniku. Operacja przebiega analogicznie do poprzednich, wystarczy upuścić obiekt ponad pojemnikiem i spadnie on do środka, w związku z narzuconymi właściwościami fizycznymi.

7. Podsumowanie

Współpraca operatora z robotem to szczególne podejście do procesu robotyzacji. Zawiera składnik ludzki, który trudno zasymulować standardowymi rozwiązaniami. Dzięki zastosowaniu wirtualnej rzeczywistości uzyskujemy pogląd na projektowany proces, już we wczesnym etapie. W artykule przedstawiono przegląd stosowanych rozwiązań zawierających połączenie robotyki z wirtualną rzeczywistością. Omówiono także dostępne roboty kolaboracyjne wielu producentów. Opi-

sano również wykonanie i oprogramowanie modelu stacji zrobotyzowanej pozwalającej na realizację współpracy człowiek – maszyna w wirtualnej rzeczywistości. Właściwa symulacja procesu wymagała opracowania i dobrania modeli CAD. Zostały one odpowiednio skonfigurowane, aby operator mógł na nie oddziaływać w trakcie symulacji. Modele oddziałują również między sobą z uwagi na nadane właściwości fizyczne. Takie rozwiązanie pozwala na lepsze urzeczywistnienie procesu.

Środowisko RobotStudio pozwoliło na wykonanie projektu i oprogramowania stanowiska. W pracy omówiono najważniejsze elementy oprogramowania stacji. Człowiek dzięki zastosowaniu technologii VR może oddziaływać na elementy symulacji. Kontrolery ręczne umożliwiają chwytanie obiektów w sposób bliski do tego, w jaki przebiega to w rzeczywistości. Zastosowanie technologii VR istotnie zwiększa możliwości wizualizacji funkcjonowania współpracy między człowiekiem a robotem.

Bibliografia

- Honczarenko J., *Roboty przemysłowe. Budowa i zastosowanie*, WNT, Warszawa 2004.
- Kaczmarek W., Panasiuk J., *Wybrane konstrukcje robotów przemysłowych*. „Napędy i Sterowanie”, Nr 9, 2018, 132–140.
- Mariscal M.A., González-Pérez J., Khalid A., Gutierrez-Llorente J.M., García-Herrero S., *Risks management and cobots. Identifying critical variables*, Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference, 2019, DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3 0791-cd.
- Kaczmarek W., Panasiuk J., *Języki programowania a programowanie robotów*. „Napędy i Sterowanie”, Nr 3, 2019, 72–79.
- Jankowski J., *Zastosowanie technik rzeczywistości wirtualnej w zdalnej kontroli pracy robota inspekcyjnego*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 18, Nr 1, 2014, 112–118, DOI: 10.14313/PAR_203/112.
- Szybicki D., Pietruś P., *Zastosowanie wirtualnej rzeczywistości w projektowaniu stacji zrobotyzowanych*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 24, Nr 2/2020, 63–68, DOI: 10.14313/PAR_236/63.
- Burghardt A., Szybicki D., Gierlak P., Kurc K., Pietruś P., Cygan R., *Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins*. “Applied Sciences”, Vol. 10, No. 2, 2020, DOI: 10.3390/app10020486.
- Robotics, A. B. B. (2019). YuMi—IRB 14000 – [www.itechnique.ch/wa_files/YuMi-IRB14000-presentation-external.pdf].
- https://library.e.abb.com/public/a83e9a8c1543470dabc7b5fcb289f679/9AKK106354A3254_datasheet_YuMi_RevH.pdf, (dostęp 27.12.2020).
- Męzyk J., Burski B., *Laboratory stand for human robot cooperation*. “Problemy Eksploatacji”, T. I, 2016, 17–28.
- Gaidano M., *Interfacing Matlab with the collaborative robot UR3* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino), 2018.
- www.elmark.com.pl/pl/pdf/86044.pdf, (dostęp 27.12.2020).
- KUKA. *Sensitive robotics_LBR iiwa* – [www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_lbr_iiwa_brochure_en.pdf].
- KUKA. *ii feel you* – [www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eeca542d3b736af377562ecaa/db_lbr_iiwa_en.pdf].
- Mitsubishi Electric Collaborative Robot Melfa Assista – [www.mitsubishielectric.com/fa/products/rbt/robot/pr/doc/109104_partner.pdf].
- [www.yaskawa.pl/Global%20Assets/Downloads/Brochures_Catalogues/Robotics/MOTOMAN_Robots/HC20DT/Flyer_Robot_HC20DT_E_02.2020.pdf].
- Spyrka M., Krenich S., *Modelowanie i symulacja zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego z wykorzystaniem*

- aplikacji ABB ROBOT STUDIO*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 15, Nr 2, 2011, 648-655.
18. Dank R., *Boot The Bot: Java-based Simulation, Code Generator and Live Controller for ABB Robots*. “Journal of Automation and Control Engineering”, Vol. 1, No. 1, 2013, 25-30, DOI: 10.12720/joace.1.1.25-30.
19. Robotics, A. B. B. Instrukcja obsługi IRC5 z panelem FlexPendant, 2004.
20. Słota A., Domka M., *Programowanie skoordynowanych ruchów robotów na przykładzie robotów ABB i Fanuc*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 14, No. 2, 2010, 635-644.
21. Ofei F., Musah I., *Development of robot cell for interactive catapult*, 2012 – [www.theseus.fi/handle/10024/46090].

Design and Software of a Station with a Collaborative Robot with the Use of VR

Abstract: Collaborative industrial robots meet the modern approach to robotization. They enable cooperation with a human being in the robot’s work area. As part of the article, it was decided to design and build a robotic station enabling the implementation of human-machine cooperation. CAD models of the station were created using the Autodesk Inventor software. The station design was made in the RobotStudio environment with the use of the IRB 14000 YuMi robot. The software is based on smart components and Rapid language code. A graphical user interface was created, interactive with a human in virtual reality. The software was verified with the participation of the operator in virtual reality.

Keywords: collaborative robot IRB 14000 YuMi, virtual reality, human-machine

mgr inż. Paulina Pietruś

p.pietrus@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0002-6428-0959

Urodziła się w Rzeszowie. Studia wyższe ukończyła na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. W roku akademickim 2016/2017 podjęła studia doktoranckie na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. W tym samym roku rozpoczęła pracę w Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki, gdzie obecnie jest asystentem. Jej zainteresowania naukowe – szeroko pojęta mechatronika, programowanie robotów przemysłowych.



dr inż. Magdalena Muszyńska

magdaw@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0002-0113-6159

Ukończyła studia w zakresie mechatronika na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w 2005 r. W roku akademickim 2005/2006 podjęła studia doktoranckie na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Od tego też roku jest pracownikiem Katedry Mechaniki Stosowanej i Robotyki, gdzie obecnie pracuje na stanowisku adiunkta. Stopień doktora nauk technicznych uzyskała w 2012 r. Jej zainteresowania naukowe dotyczą m.in. zagadnień sterowania robotami kołowymi z uwzględnieniem metod adaptacyjnych i inteligentnych. Jest współautorem publikacji krajowych i międzynarodowych.

