

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KIERUNEK: MECHATRONIKA

SPECJALNOŚĆ: MECHATRONIKA W SYSTEMACH WYTWÓRCZYCH

PRACA DYPLOMOWA

MAGISTERSKA

Analiza zapotrzebowania na roboty
współpracujące z implementacją
przykładowych zadań

Analysis of demand for collaborative
robots with implementation of
exemplary tasks

AUTOR:

Damian Góral

PROMOTOR:

dr inż. Robert Muszyński

OCENA PRACY:

Dla rodziców

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	6
1.1 Cel i zakres pracy.....	8
2. Specyfikacja własności robotów współpracujących	9
3. Przegląd robotów współpracujących	12
3.1 Universal Robots.....	12
3.2 FANUC	21
3.3 KINOVA.....	27
4. Przegląd aplikacji współpracujących	32
5. Przykładowe aplikacje robotów współpracujących.....	36
5.1 Universal Robots.....	36
5.2 FANUC	41
5.3 KINOVA.....	43
6. Podsumowanie.....	46
7. Bibliografia.....	49

1. Wprowadzenie

Od wielu lat roboty przemysłowe obecne są w niemal każdej branży produkcyjnej. Nieprzerwanie obserwowany jest wysoki wzrost ich sprzedaży, na co wskazuje m.in. raport Międzynarodowej Federacji Robotyki (rysunek 1.1) [1]. Według tego raportu w 2016 roku wzrost wyniósł 16% i według prognoz na tak wysokim poziomie będzie utrzymywał się przez kolejne lata. Liczby te świadczą o tym, jak bardzo rozwojowym rynkiem jest rynek robotów przemysłowych.

Omawiane w pracy roboty przemysłowe rozumiane są jako urządzenia manipulacyjne zgodne z pochodzącą z norm ISO definicją: „Automatycznie sterowany, reprogramowalny, uniwersalny manipulator, programowany w trzech lub więcej osiach, który może być urządzeniem zamocowanym na stałe albo mobilnym, przeznaczony do zastosowania w aplikacjach automatyki przemysłowej” [2]. Zostały one zaprojektowane, aby zastąpić ludzi w pracach na stanowiskach uciążliwych, monottonnych, niebezpiecznych, wymagających dużej siły fizycznej lub precyzji. Wdrożenia robotów pozwalają także na skrócenie czasów wykonywania procesów, wprowadzenie powtarzalności przy zachowaniu precyzji, a także zniwelowanie czynnika ludzkiego. To wszystko przekłada się na znaczne zwiększenie wydajności, poprawę jakości oraz obniżenie kosztów produkcji.

Roboty przemysłowe są traktowane jako zaawansowane maszyny a ich instalacja, programowanie i konserwacja wymaga wysokiej wiedzy technicznej. Ze względu na złożoność urządzenia, projektowanie stanowisk zrobotyzowanych w większości przypadków zlecane jest firmom zewnętrznym (integratorom). Integratorzy ci, po uruchomieniu takiego stanowiska, ograniczają dostęp operatorów do poziomu uruchomienia i zatrzymania aplikacji. Takie rozwiązanie wyklucza wprowadzanie zmian przez samych użytkowników, a dane stanowisko dedykowane jest do wykonywania jednego zadania. Każdorazowa zmiana funkcjonalności stanowiska wymaga kontaktu z integratorem.

Wspomniane powyżej ograniczenia wynikają także z kwestii bezpieczeństwa. Projektowane systemy zrobotyzowane często składają się z dużych robotów o znacznych udźwigach oraz przyspieszeniach. Duże wartości tych parametrów sprawiają, że roboty przemysłowe stwarzają zagrożenie dla znajdującego się w pobliżu człowieka. W związku z tym, jednym z większych problemów jest zapewnienie bezpieczeństwa operatorom znajdującym się w obszarze pracy robota. Aby to uzyskać, konieczne jest odizolowanie stanowiska od ludzi i zabezpieczenie przed wtargnięciem człowieka w obszar pracy maszyny. W tym celu gniazda zrobotyzowane należy wyposażać w dodatkowe urządzenia bezpieczeństwa oraz bariery ochronne, co ponownie wiąże się z ograniczaniem dostępu.

Taki stan rzeczy jest szczególnie uciążliwy w dobie Przemysłu 4.0, którego to jednym z celów jest sprostanie rosnącej personalizacji produktów. Przedsiębiorstwa produkcyjne coraz częściej wytwarzają krótkie serie pojedynczych i spersonalizowanych wyrobów. A taka zmienność produkcji wymagała od urządzeń większej elastyczności oraz łatwości przeobrażania, na co w pełni nie pozwalają wspomniane powyżej tradycyjne gniazda zrobotyzowane.



Rysunek 1.1 Raport sprzedaży robotów przemysłowych w latach 2008-2016 oraz przewidywania na lata 2017-2020, Międzynarodowa Federacja Robotyki [1]

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty projektowania stanowisk zrobotyzowanych, wdrożenie takiego systemu okazuje się być bardzo obszernym zagadnieniem. Wygospodarowanie przestrzeni na dużego robota, zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa oraz kadry inżynierów robotyków wymaga dużych nakładów finansowych. Często także przy wprowadzaniu tego typu maszyn konieczna jest przebudowa dodatkowych stanowisk współpracujących z robotem (prze-nośników taśmowych, magazynów, podajników itd.). Wprowadzenie więcej niż jednego robota wiąże się również z długim czasem wdrożenia oraz kosztownym zatrzymaniem produkcji. Wszystkie te czynniki sprawiają, że na robotyzację w większości przypadków stać jedynie duże firmy. Przykładem może być branża Automotive w której praktycznie 100% zakładów stosuje roboty przemysłowe a linie składające się tylko i wyłącznie z robotów – to od wielu lat standard (rysunek 1.2). Na tak duże modernizacje i koszty nie mogą jednak pozwolić sobie małe i średnie przedsiębiorstwa. W Polsce jest zaledwie 15% małych firm, które wyposażają swoje zakłady w roboty przemysłowe [4].

Chcąc wprowadzić manipulatory przemysłowe do obszarów niedostępnych dla klasycznej robotyki należało zaprojektować urządzenia, które spełniając podobne funkcje do robotów przemysłowych nie będą jednocześnie ciężkimi oraz niebezpiecznymi maszynami. Powinny one być również łatwo programowalne oraz posiadać możliwość szybkiego przezbierania. I tak, w 1997r profesorowie z Uniwersytetu Northwestern złożyli wniosek patentowy na maszynę o nazwie „Cobot” [5]. Cobot (ang. *robot for collaborative applications*) to przemysłowy manipulator, który nosi miano robota współpracującego (kolaborującego). Cobot działa jako asystent i jest zaangażowany w złożone i wymagające wyczucia zadania, które nie mogą być w pełni zautomatyzowane. Jego celem jest wykonywanie czynności na obiektach, które następnie przekazywane są ludziom w środowisku kooperacji. Cechuje go mała waga, łatwość programowania oraz wbudowane systemy bezpieczeństwa. Takie podejście sprawia, że roboty współpracujące stają się idealnym rozwiązaniem dla małych i średnich przedsiębiorstw oraz w miejscach, gdzie nie ma możliwości w pełni zautomatyzowania procesu, wpisując się tym samym w idee wspomnianego Przemysłu 4.0 jako „zielone roboty”.



Rysunek 1.2 Fabryka BMW w Spartanburgu, linia do zrobotyzowanego zgrzewania [3]

1.1 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest implementacja wybranych zastosowań robotów współpracujących, która posłuży do analizy dostarczanych przez nie nowych funkcjonalności na tle funkcjonalności klasycznych robotów przemysłowych. Dodatkowo zidentyfikowane funkcjonalności zostaną odniesione do potrzeb obserwowanych na rynku i posłużą do określenia obecnych i nowych obszarów zastosowań robotów współpracujących.

Układ pracy jest następujący. W rozdziale drugim scharakteryzowano własności robotów współpracujących. Rozdział trzeci zawiera przegląd najczęściej stosowanych cobotów. W rozdziale czwartym zidentyfikowano obszary zastosowań robotów współpracujących. Rozdział piąty przedstawia przykładowe aplikacje zaimplementowane na wybranych urządzeniach. Całość podsumowuje rozdział szósty.

2. Specyfikacja własności robotów współpracujących

Roboty współpracujące posiadają szereg cech, które różnią je od klasycznych robotów przemysłowych. Cechy te można podzielić na 3 grupy: konstrukcyjne, użytkowe oraz dotyczące bezpieczeństwa. Wszystkie te własności przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.2.1 Podział na grupy cech różniących roboty współpracujące od klasycznych robotów przemysłowych

Grupa	Robot przemysłowy	Cobot
Cechy konstrukcyjne	Ostre krawędzie, wystające elementy	Budowa mająca łagodzić skutki ewentualnych kolizji
	Duże rozmiary i waga wymagające kotwiczenia maszyny	Małe rozmiary oraz waga, typowo 40% niższa od klasycznych robotów przemysłowych
	Wymagana duża przestrzeń robocza	Brak wymagań o wielkości przestrzeni roboczej
	Montaż na stałe	Niewymagany montaż na stałe, łatwość przemieszczania
Cechy użytkowe	Programowanie wymaga wiedzy programistycznej	Łatwo programowalne
	Zaawansowana konfiguracja	Szybka konfiguracja
	Instalacja dla jednej aplikacji	Elastyczność rozlokowania
Bezpieczeństwo	Zewnętrzne bariery bezpieczeństwa	Wbudowane bariery bezpieczeństwa
	Brak wbudowanych sensorów oraz wymagane systemy zewnętrzne	Wbudowane sensory bezpieczeństwa

Już na pierwszy rzut oka cobot od robota przemysłowego różni się budową zewnętrzną. Obłe kształty, brak ostrych krawędzi oraz brak elementów znajdujących się poza obudową robota to domena robotów współpracujących. Tak zaprojektowana konstrukcja zabezpiecza operatora przed skaleczeniem oraz pozwala złagodzić skutki ewentualnej kolizji. Charakterystyczna dla tego typu robotów jest także mała waga urządzenia. Masa ramienia, najczęściej do 50 kg, pozwala na szybki montaż oraz szybkie zmiany miejsca pracy urządzenia. Maszyna nie jest już ściśle związana z jednym miejscem kotwiczenia a jest narzędziem, które można wykorzystywać w różnych gniazdach produkcyjnych, w zależności od zapotrzebowania. Ta własność jest szczególnie pożądana w małych przedsiębiorstwach, w których dominują krótkie serie produkcyjne i zróżnicowane detale.

Wśród producentów urządzeń automatyki zauważalny jest trend projektowania urządzeń przemysłowych, których obsługa jak i programowanie ma być dostępne dla osób nieposiadających specjalistycznej wiedzy. Tą cechą także wyróżniają się roboty współpracujące. W myśl tworzenia technologii dostępnej dla każdego, programowanie cobotów nie wymaga wiedzy z zakresu

programowania a tworzenie aplikacji staje się dostępne dla pracowników niebędących robotykami. Przy mniej skomplikowanych aplikacjach nie występuje konieczność wdrażania systemów przez integratorów. Do typowych cech łatwego programowania możemy zaliczyć:

- programowanie za pomocą gotowych modułów funkcji,
- prowadzenie robota ręką.

Takie podejście sprawia, że robot jest bardziej elastyczny a przeobrażanie systemu można wykonać bez udziału firm zewnętrznych.

Kolejnymi własnościami, które przede wszystkim sprawiają, że cobot nosi miano współpracującego, to systemy bezpieczeństwa. Zgodnie z dyrektywą maszynową robot przemysłowy jest maszyną nieukończoną, która nie ma wyznaczonego sposobu użycia oraz zastosowania a certyfikat CE nakładany jest na całe aplikacje [6]. W przypadku klasycznych robotów przemysłowych, nieposiadających wbudowanych systemów bezpieczeństwa, do uzyskania statusu bezpiecznej aplikacji musi zawierać [7]:

- segmentację obszarową,
- łatwodostępny przycisk stopu awaryjnego,
- odgrodzenie całego systemu,
- oznaczenie strefy pracy robotów żółtymi pasami na podłożu,
- zabezpieczenia przed wtargnięciem człowieka w strefę pracy robota,
- ochronę pracowników przez urazem od systemu transportowego.

W tym celu należy wyposażyć robota w urządzenia zewnętrzne takie jak [7]:

- kurtyny fotoelektryczne,
- maty naciskowe,
- radary mikrofalowe
- czujniki oparte o elementy piezoelektryczne
- detektory podczerwieni,
- systemy wizyjne,
- skanery laserowe,
- czujniki zmian pojemności,
- detektory ultradźwiękowe.

W przypadku robotów współpracujących zapewnienie bezpieczeństwa stanowiska zrobotyzowanego jest realizowane nie tylko przez zewnętrzne urządzenia, ale w głównej mierze poprzez wbudowane w urządzenie systemy. Dzięki wbudowanym sensorom oraz przy odpowiednio zaprojektowanej aplikacji nie wymaga się stosowania zewnętrznych barier ochronnych, a stanowisko dopuszcza pojawienie się człowieka w obszarze pracy maszyny. Całość jest unormowana specyfikacją techniczną ISO/TS15066, która definiuje bezpieczne metody interakcji między człowiekiem a robotem. I tak rozróżniamy typy interakcji [8]:

- Monitorowanie zatrzymania, bezpieczne zatrzymanie robota w momencie pojawienia się człowieka w obszarze kolaboracyjnym. Kolidacja nie występuje.
- Prowadzenie ręką, możliwość prowadzenia robota ręką po bezpiecznym jego zatrzymaniu. Brak możliwości wystąpienia kolizji.

- Monitorowanie prędkości i separacji, człowiek i robot poruszają się jednocześnie w przestrzeni kolaboracyjnej. Prędkość robota zależy od jego odległości od człowieka, która monitorowana jest za pomocą technologii bezpieczeństwa. Bezpieczne zatrzymanie odbywa się przy krytycznym zbliżeniu się do robota. Brak możliwości wystąpienia kolizji.
- Ograniczenie mocy i siły, występuje możliwość kontaktu człowieka z robotem. Redukcja ryzyka poprzez bezpieczne funkcje robota. Istnieje możliwość wystąpienia kolizji, która prowadzi do bezpiecznego zatrzymania.

Dla każdego typu interakcji możliwe są kategorie zatrzymania od 0 do 2. I tak, systemy bezpieczeństwa cobotów pozwalają wykryć obecność człowieka w strefie pracy automatycznej, wydzielić obszary kolaboracji oraz awaryjnie zatrzymać robota w momencie wystąpienia kolizji. Zatrzymania te dzielą się na 3 kategorie [8]:

- 0 (zatrzymanie awaryjne), w której ruch robota zostaje natychmiastowo zatrzymany poprzez odłączenie zasilania,
- 1 (kontrolowane zatrzymanie), ruch robota zostaje zatrzymany przy dostępnym zasilaniu potrzebnym do zatrzymania a następnie następuje usunięcie zasilania,
- 2 (kontrolowane zatrzymanie), zatrzymanie z zasilaniem pozostałym do dyspozycji robota. System sterowania związany z bezpieczeństwem monitoruje, czy robot pozostaje w pozycji zatrzymania.

Różne typy interakcji cobota z człowiekiem, jak i różne rodzaje zatrzymań powodują, że systemy bezpieczeństwa muszą być rozbudowane oraz dostosowane do sytuacji zagrożenia. Najpopularniejsze z nich to [9]:

A. środki pasywne:

- zwiększenie powierzchni kontaktu,
- pochłanianie energii (elastyczność, piankowy materiał),

B. środki aktywne:

- kontrola sił i momentów w przegubach,
- kontrola zewnętrznych sił przy zastosowaniu dodatkowych czujników,
- ograniczenia pozycji osi oraz prędkości obrotowej w przegubach,
- pokrycia sensoryczne,
- systemy wizyjne i laserowe.

3. Przegląd robotów współpracujących

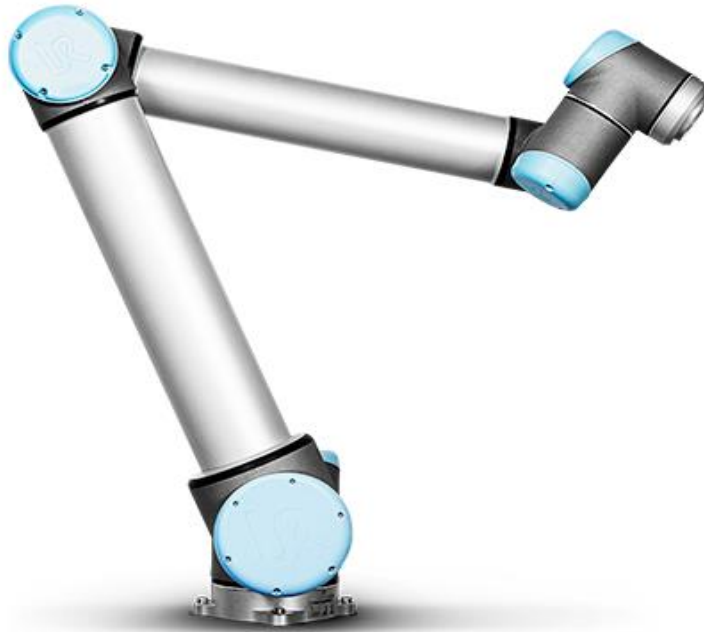
Pierwszym producentem, który wprowadził na rynek robota współpracującego była duńska firma Universal Robots [10]. W 2009 r. zaprezentowała ona model robota UR5. Mały robot o masie 18kg posiadał wszystkie, opisane w poprzednim rozdziale, cechy cobota: elastyczność rozlokowania, łatwość programowania oraz wbudowane systemy bezpieczeństwa. Dzięki temu bardzo szybko znalazł zastosowanie w małych i średnich przedsiębiorstwach. Śladem duńskiego producenta poszli także najwięksi producenci robotów przemysłowych. I tak, firma ABB opracowała dwuramiennego robota YuMi – IRB 14000 [11]. Podobnie niemiecki producent KUKA poszerzył swoją ofertę o siedmioosiowego robota kolaborującego LBR iiwa [12], wyposażonego w czujniki momentu w przegubach. W 2015 r. także FANUC wprowadził do swojej oferty robota współpracującego CR-35iA [13] tworząc tym samym nową linię zielonych robotów. Manipulatory kolaboracyjne to asystenci nie tylko w pracach przemysłowych, ale także w codziennym życiu. Z takiego założenia wyszła kanadyjska firma KINOVA, która wprowadziła na rynek manipulatory JACO oraz MICO zaprojektowane do wykonywania codziennych zadań [14]. Podążając za trendem zielonej robotyki swoje coboty prezentują także inne firmy, m.in. Yaskawa, Comau, Kawasaki, Rethink Robotics, Festo.

3.1 Universal Robots

Duński producent cobotów dostarcza 6-osiowe ramiona (rysunek 3.1) w 3 wersjach różniących się udźwigniem oraz wielkością przestrzeni roboczej (tabela 3.1). Zgodnie z przedstawionymi w rozdziale drugim (tabela 2.1) ogólnymi własnościami robotów współpracujących, cechy charakterystyczne robotów UR także można rozpatrzeć w 3 kategoriach: cechy konstrukcyjne, użytkowe oraz dotyczące bezpieczeństwa.

Cechy konstrukcyjne to przede wszystkim modułowa budowa (rysunek 3.2), brak ostrych krawędzi, małe rozmiary oraz waga. Także napędy wyróżniają robota UR na tle klasycznych robotów przemysłowych. Te zastosowane w nim to modułowe zespoły elementów. Zespół to zintegrowany serwonapęd bazujący na synchronicznym silniku prądu stałego z magnesami trwałymi oraz układzie dwóch enkoderów absolutnych (rysunek 3.2). Do przeniesienia napędu użyta została przekładnia falowa – takie rozwiązanie nie wymaga corocznych przeglądów oraz wymiany smarów oraz olei. Do własności konstrukcji należy także możliwość zasilania robota z sieci 230 V, co przekłada się na szybsze rozpoczęcie pracy z urządzeniem bez potrzeby modernizacji źródła zasilania.

Następną grupą cech to cechy użytkowe. Coboty mają charakteryzować się szybką konfiguracją oraz łatwością programowania. W przypadku robotów Universal Robots konfiguracja ogranicza się do zdefiniowania obciążenia, jakiemu poddawany jest robot, jego środka ciężkości oraz położenia punktu TCP (rysunek 3.3). Konfiguracja odbywa się poprzez panel operatorski robota a interfejs graficzny ułatwia wykonanie zadania. Należy pamiętać jednak, że opisywane coboty nie posiadają możliwości pomiaru wagi elementów które są aktualnie przenoszone (chwytek, detal, itp.). Stąd każdemu chwytaniu detalu lub jego odkładaniu musi towarzyszyć zmiana wpisanej wartości obciążenia (przy użyciu funkcji „set payload”). To ustawienie jest bardzo ważne,



Rysunek 3.1 Robot współpracujący UR5 [15]

Tabela 3.1 Modele robotów Universal robots

Parametry	UR3	UR5	UR10
udźwig	3 kg	5 kg	10 kg
zasięg	500 mm	850 mm	1300mm
powtarzalność	±0,1 mm	±0,1 mm	±0,1 mm
waga	11 kg	18,4 kg	28,9 kg
zasilanie	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz
Liczba wbudowanych systemów bezpieczeństwa	15	15	15
programowanie	<ul style="list-style-type: none"> • online – oprogramowanie PolysCope, • offline – symulator robota. 	<ul style="list-style-type: none"> • online – oprogramowanie PolysCope, • offline – symulator robota. 	<ul style="list-style-type: none"> • online – oprogramowanie PolysCope, • offline – symulator robota.

ponieważ jego niepoprawne zdefiniowanie powoduje, że układ sterowania próbuje przeciwdziałać nieistniejącym siłom, co wpływa na szybsze zużycie zespołów napędowych robota¹.

Dalszą cechą użytkową cobotów UR jest łatwość programowania. Jak w przypadku klasycznych robotów przemysłowych UR posiada możliwość programowania online za pomocą panelu operatora. Oprogramowanie zastosowane w urządzeniu to autorskie środowisko PolyScope, działające w oparciu o system Linux. Środowisko jest tak zaprojektowane, aby było łatwe w obsłudze oraz pozwalające szybko rozpocząć programowanie robota. Programowanie to odbywa się poprzez wybór gotowych bloków i zdefiniowaniu ich parametrów. PolyScope posiada 3 grupy bloków wybieralnych (rysunek 3.4):funkcje podstawowe:

A. funkcje podstawowe:

- move,
- wait,
- popup,
- comment,
- waypoint,
- set,
- halt,
- fold,

B. funkcje zaawansowane:

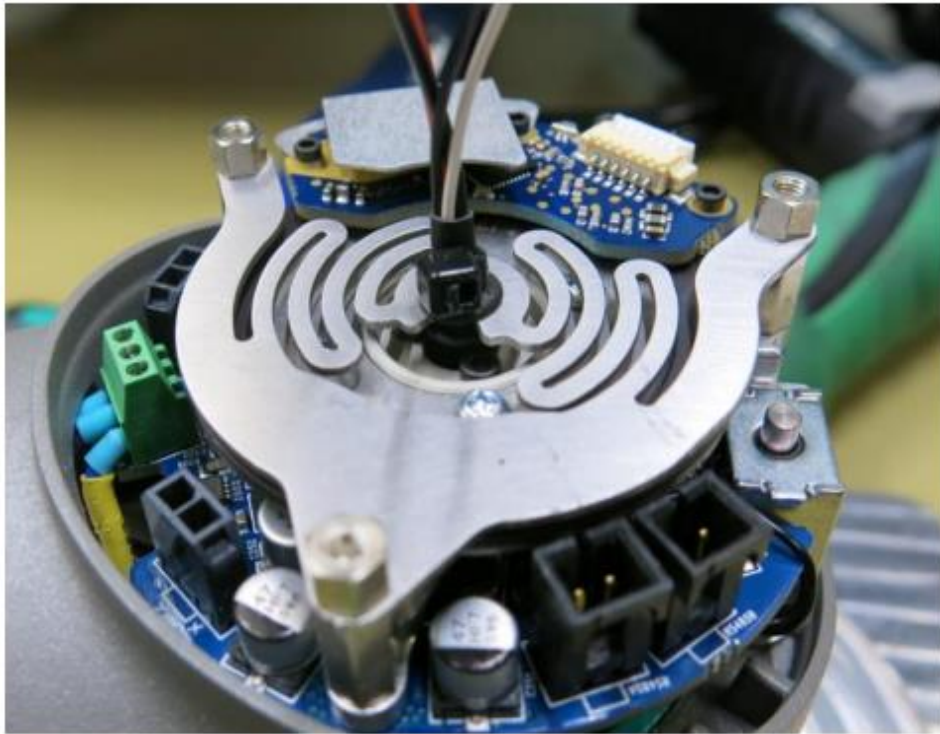
- loop,
- assignment,
- script code,
- thread,
- subprog,
- if...else,
- event,
- switch,

C. funkcje typu „wizards”

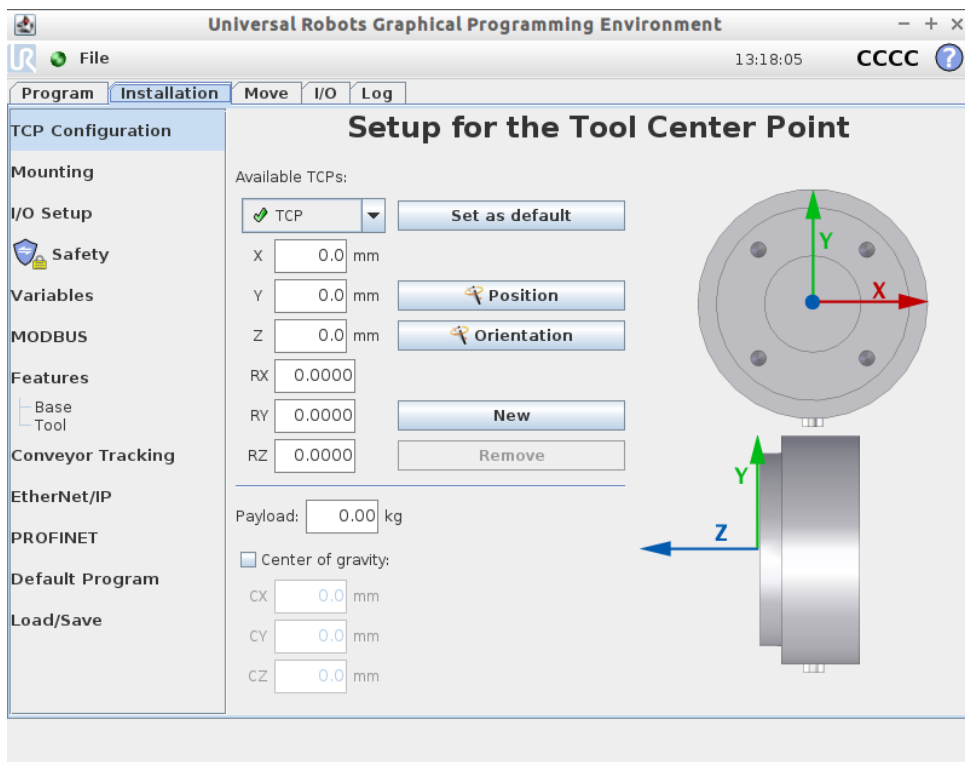
- pallet,
- seek,
- force,
- conveyor tracking.

Bloki z kategorii podstawowej oraz zaawansowanej to proste funkcje, takie jak funkcje ruchu „move”, jak i instrukcje warunkowe, pętle itp. Robot UR posiada także gotowe moduły w zakładce „wizards” jak np. moduł do paletyzacji. Dla przykładu, w przypadku funkcji „pallet” wystarczy wskazać wymiary palety, liczbę elementów czy punkt dojazdu, a pozycje każdego z elementów zostaną automatycznie wyliczone. Wymienione bloki funkcyjne są dostępne bezpośrednio z edytora programu i pozwalają na łatwe zaprogramowanie robota w przypadku większości prostych aplikacji. Dla zwiększenia możliwości programowania, poza wymienionymi funkcjami, robot posiada możliwość programowania z użyciem języka skryptowego. Służy do tego blok „script code”, który pozwala na ręczne wpisywanie funkcji. Lista dostępnych funkcji wraz z ich atrybutami zawarta jest w instrukcji obsługi [16]. Łatwość programowania można zauważyć także podczas programowania punktów. Szybkość i prostotę uczenia punktów zapewnia możliwość prowadzenia robota ręką. Operator zwalnia hamulce przyciskiem na panelu operatora i lekkim ruchem wskazuje aktuatorem robota punkt. Programowanie punktów można realizować także w klasyczny sposób za pomocą panelu operatora (rysunek 3.5).

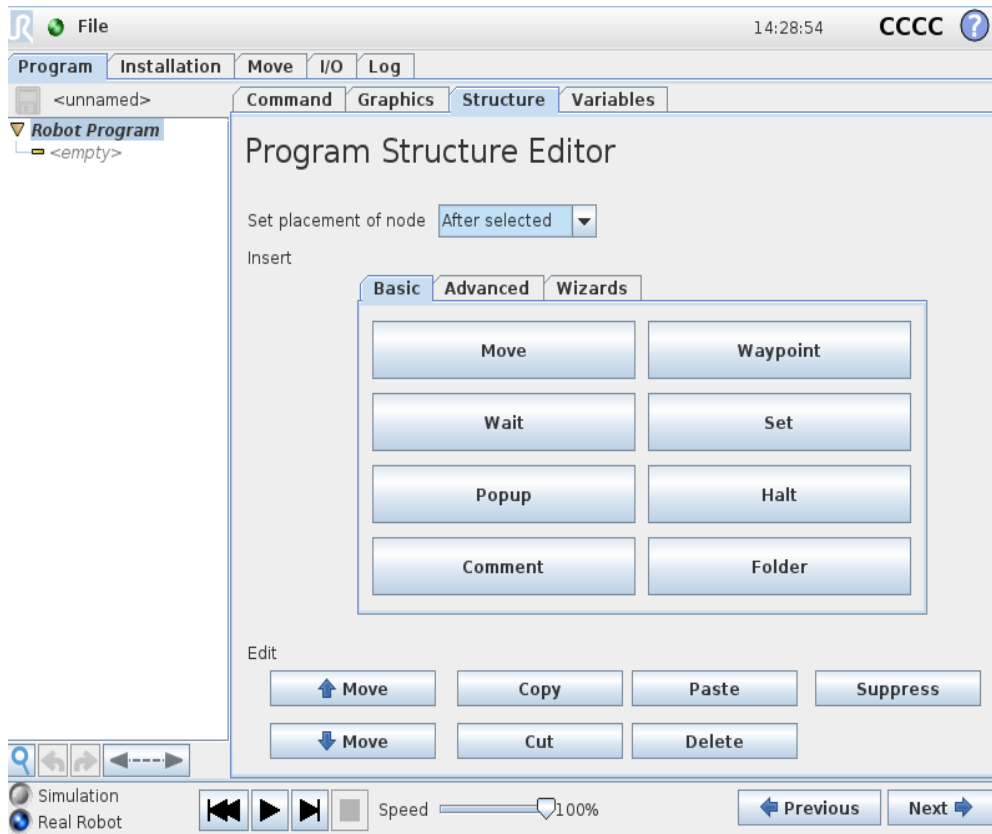
¹ Według danych polskiego dystrybutora Universal Robots 80% awarii związane jest ze źle zainicjalizowanymi parametrami [17].



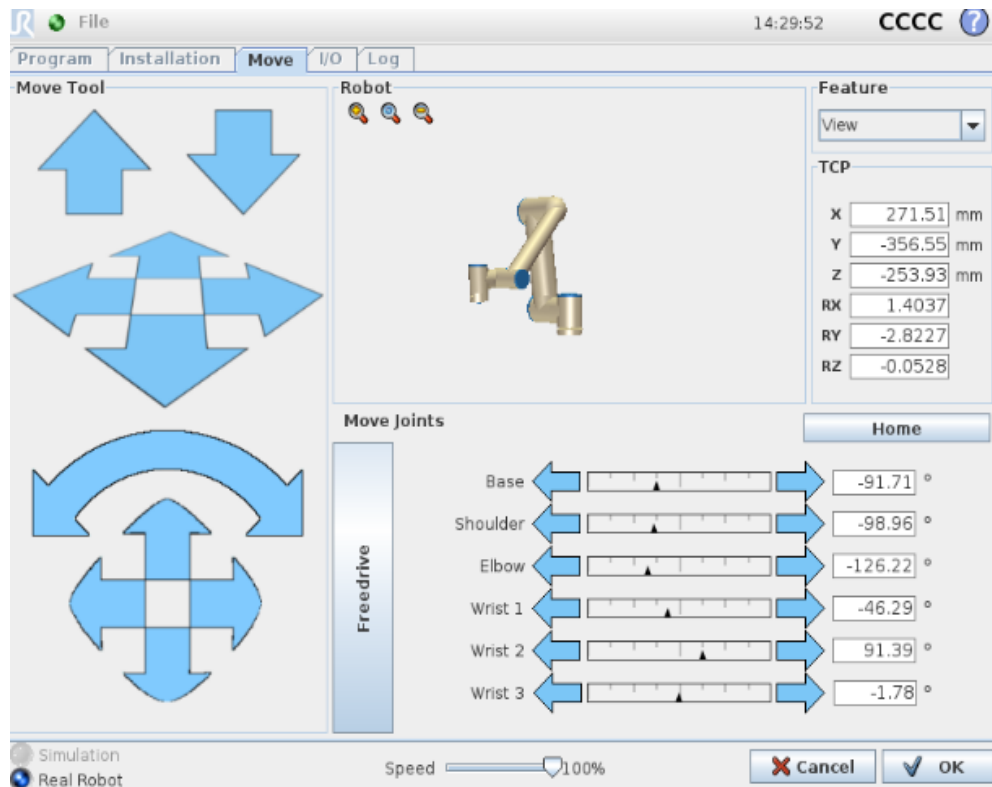
Rysunek 3.2 Serwonapęd robota UR5 [16]



Rysunek 3.3 Konfiguracja TCP, robot UR5



Rysunek 3.4 Edytor programu, funkcje podstawowe, robot UR5



Rysunek 3.5 Programowanie punktów, robot UR5

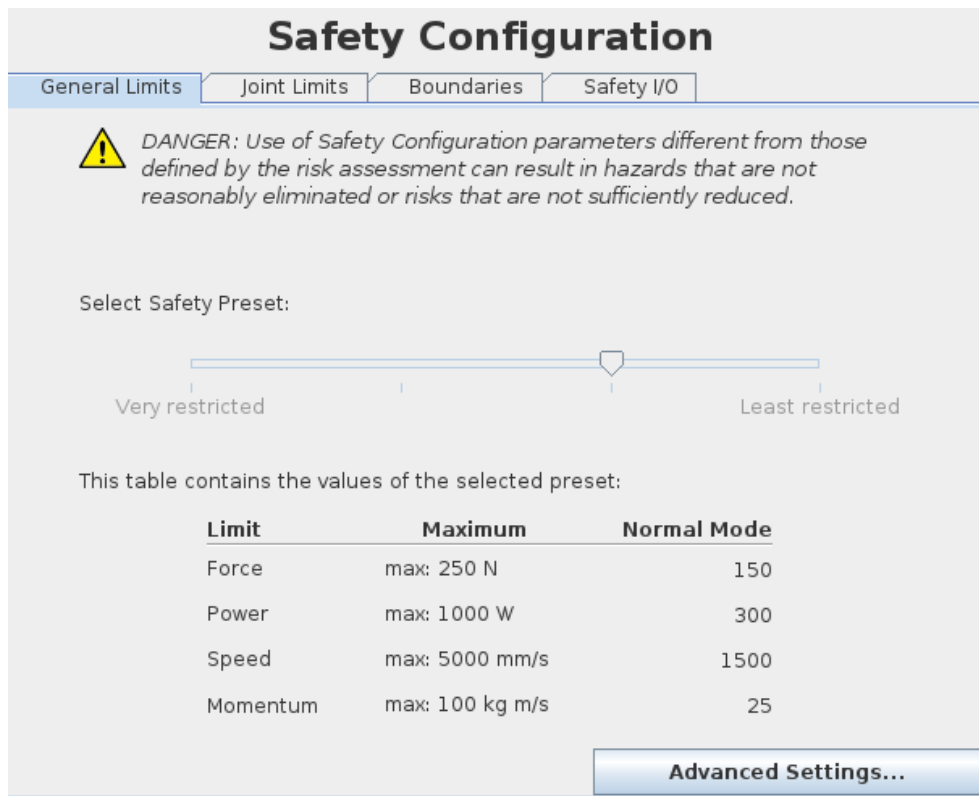
Ostatnimi własnościami cobotów UR, które sprawiają, że są one uznawane za współpracujące to systemy bezpieczeństwa. Takich systemów posiadają one 15, z których wszystkie są przetestowane oraz zatwierdzone certyfikatem TUV NORD [18] według normy EN ISO 13849-1:2008. Systemy te kontrolują pozycję, prędkość oraz moment obrotowy osi robotów oraz punktu TCP. Kontrolują momenty działające na robota poprzez pomiary prądu i napięć oraz kontrolują sygnały z wyjść cyfrowych dla urządzeń zewnętrznych. Kontrola ta odbywa się osobno dla dwóch konfigurowalnych trybów – pracy automatycznej oraz trybu zredukowanego. Wszystkie te funkcje szczegółowo przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Funkcje bezpieczeństwa robota Universal Robots [9]

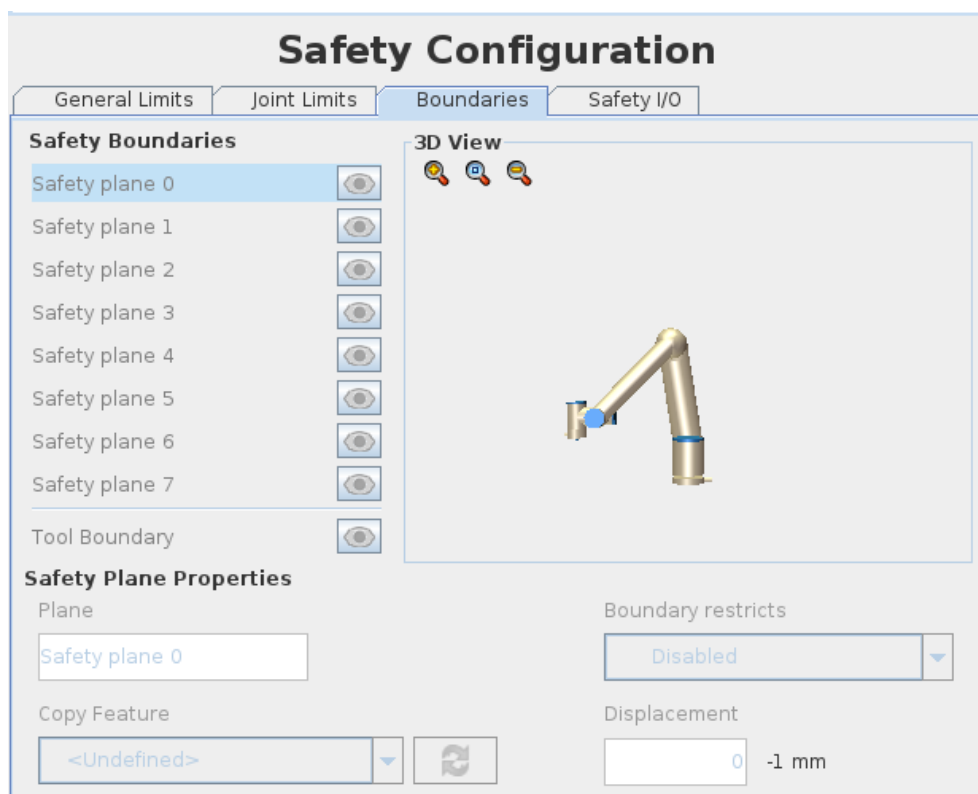
Numer funkcji	Funkcja	Kategoria wyłączenia	Opis	Element kontrolowany
SF0	Wyłączenie bezpieczeństwa	0 i 1	Uruchamiane przez wyłącznik bezpieczeństwa na kontrolerze	Ramię robota
SF1			Uruchamiane przez zewnętrzny wyłącznik skonfigurowany z wejściem bezpieczeństwa	
SF2	Wyłączenie ochronne	2	Uruchamiane przez zewnętrzne urządzenia skonfigurowane z wejściami bezpieczeństwa	Ramię robota
SF3	Kontrola pozycji osi	0	Przekroczenie limitu pozycji każdej osi powoduje zatrzymanie	Oś robota (każda)
SF4	Kontrola prędkości osi	0	Przekroczenie limitu prędkości obrotowej osi powoduje zatrzymanie	Oś robota (każda)
SF5	Kontrola momentu obrotowego	0	Przekroczenie limitu momentu obrotowego osi powoduje zatrzymanie	Oś robota (każda)
SF6	Kontrola pozycji punktu TCP	0	Przekroczenie pozycji punktu TCP powoduje zatrzymanie	TCP
SF7	Kontrola prędkości punktu TCP	0	Przekroczenie limitu prędkości punktu TCP powoduje zatrzymanie	TCP
SF8	Kontrola siły w punkcie TCP	0	Przekroczenie limitu siły punktu TCP powoduje zatrzymanie	TCP
SF9	Kontrola momentu	0	Przekroczenie limitu momentu działającego na robota powoduje zatrzymanie	Ramię robota
SF10	Kontrola mocy	0	Przekroczenie limitu mocy powoduje zatrzymanie. Funkcja monitoruje pracę mechaniczną (sumę momentów oraz prędkości kątowe w przegubach). Dynamicznie ogranicza prąd zachowując prędkość robota	Ramię robota
SF11	Kontrola wyjścia Estop robota	0 i 1	Uruchamiane przez wyłącznik bezpieczeństwa urządzeń zewnętrznych podłączony do wyjść bezpieczeństwa	Urządzenia zewnętrzne

SF12	Kontrola wyjść cyfrowych podczas ruchu	0	Zawsze, gdy robot znajduje się w ruchu, podwójne wyjścia cyfrowe są w stanie niskim. Wyjścia przechodzą w stan wysoki, gdy nie ma ruchu	Urządzenia zewnętrzne
SF13	Kontrola wyjść cyfrowych podczas zatrzymania	0	Zawsze, gdy robot znajduje się w stanie zatrzymania, podwójne wyjścia cyfrowe są w stanie wysokim. Wyjścia przechodzą w stan niski, po wznowieniu ruchu	Urządzenia zewnętrzne
SF14	Kontrola wyjść cyfrowych podczas pracy w trybie zredukowanym	0	Gdy robot znajduje się w trybie zredukowanym, podwójne wyjścia cyfrowe są w stanie niskim. Tryb zredukowany może zostać wywołany przez płaszczyznę bezpieczeństwa	Urządzenia zewnętrzne
SF15	Kontrola wyjść cyfrowych podczas pracy w trybie niezredukowanym	1	Gdy robot nie jest w trybie zredukowanym wyjścia cyfrowe są w stanie niskim	Urządzenia zewnętrzne

Wymienione systemy, jak i poziom reakcji robota na pojawiające się kolizje, można konfigurować z poziomu panelu operatora. Czulość robota określa przy jak dużych momentach powstałych podczas kolizji robot zostanie zatrzymany. Wartości sił, prędkości, momentów oraz mocy, powyżej których robot zostanie zatrzymany konfigurowalne są w zakładce „safety” (rysunek 3.6). Konfiguracji dokonujemy dla dwóch trybów: pracy automatycznej (normalnej) oraz trybu zredukowanego. Tryb zredukowany to tryb, w którym wymienione parametry robota zostają ograniczone. Może on zostać wywołany poprzez sygnał zewnętrzny lub po przekroczeniu wirtualnej bariery bezpieczeństwa przez punkt TCP (rysunek 3.7). Należy jednak zauważyć, że kontrola ta dotyczy jedynie punktu TCP robota, a nie jego całej konstrukcji. Istnieje więc szansa na pojawienie się pozycji, w której część robota znajdzie się poza wirtualną barierą, pomimo że TCP jej nie przekroczył. W podobny sposób istnieje możliwość ograniczenia prędkości oraz pozycji każdego z przegubów w trybie normalnym oraz zredukowanym (rysunek 3.8).



Rysunek 3.6 Konfiguracja poziomu reakcji robota UR5



Rysunek 3.7 Definiowanie wirtualnych barier, robot UR5

Safety Configuration

General Limits
Joint Limits
Boundaries
Safety I/O

Each of the following joint limits can be configured independently:

Maximum speed
 Position range

Joints	Maximum	Normal Mode	Reduced Mode	
Base	max: 191 °/s	<input type="text" value="191"/>	<input type="text" value="191"/>	-11 °/s
Shoulder	max: 191 °/s	<input type="text" value="191"/>	<input type="text" value="191"/>	-11 °/s
Elbow	max: 191 °/s	<input type="text" value="191"/>	<input type="text" value="191"/>	-11 °/s
Wrist 1	max: 191 °/s	<input type="text" value="191"/>	<input type="text" value="191"/>	-11 °/s
Wrist 2	max: 191 °/s	<input type="text" value="191"/>	<input type="text" value="191"/>	-11 °/s
Wrist 3	max: 191 °/s	<input type="text" value="191"/>	<input type="text" value="191"/>	-11 °/s

Rysunek 3.8 Ograniczenia osi, robot UR5

3.2 FANUC

Firma FANUC zajmująca się produkcją robotów od niemal 50 lat, opracowała w 2015 roku sposób na wprowadzenie własnych robotów współpracujących. Rozwiązaniem japońskiej firmy było zmodyfikowanie klasycznego robota przemysłowego w taki sposób, aby mógł nosić miano cobota. Takiej modyfikacji dokonano na robotach FANUC M-20iA/35M oraz LR Mate 200iD, uzyskując nową linię zielonych robotów współpracujących (rysunek 3.9). Robotów kolaborujących FANUC posiada w swojej ofercie 4, różniących się udźwigiem oraz zasięgiem (tabela 3.3). Roboty współpracujące z tej serii zostały skonstruowane na bazie klasycznych robotów przemysłowych. Urządzenia te, aby mogły być traktowane jako współpracujące, po zastosowanych modyfikacjach musiały spełniać opisane w rozdziale 2 wymagania: konstrukcyjne, użytkowe oraz bezpieczeństwa.

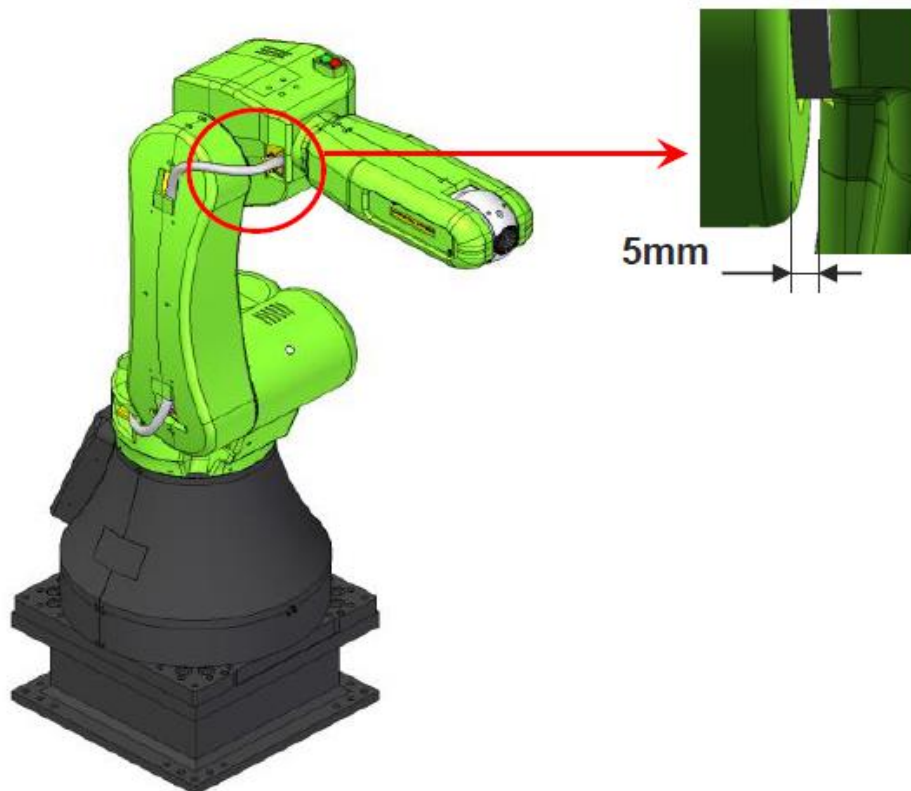
Tabela 3.3 Modele robotów współpracujących FANUC

Parametry	CR-35iA/35	CR-7iA	CR-7iA/7L	CR-4iA
udźwig	35 kg	7 kg	7 kg	4 kg
zasięg	1813 mm	911 mm	717 mm	550 mm
powtarzalność	±0.08 mm	±0.03 mm	±0.02 mm	±0.02 mm
waga	990 kg	53 kg	55 kg	48 kg
zasilanie	380-575 VAC, 50-60 Hz, 3 fazy	200-230 VAC, 50-60 Hz	200-230 VAC, 50-60 Hz	200-230 VAC, 50-60 Hz
Liczba wbudowanych systemów bezpieczeństwa	12 głównych	12 głównych	12 głównych	12 głównych
programowanie	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – Roboguide 	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – Roboguide 	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – Roboguide 	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – Roboguide

W zakresie wymagań konstrukcyjnych roboty FANUCa zostały wyposażone w piankowe poszycie, mające niwelować skutki kolizji. Poszycie zostało zaprojektowane w taki sposób, aby w obrębie konstrukcji nie doszło do zakleszczenia palców lub dłoni (rysunek 3.10). Takie zabezpieczenie jest realizowane także przez ograniczenie pozycji 2 i 3 osi urządzenia. Do cech konstrukcyjnych należy zaliczyć również podstawę robota. W podstawie tej umieszczony jest tenzometr, który monitoruje siły i momenty działające na robota z zewnątrz. Do prawidłowego działania wspomnianej funkcji, należało odseparować maszynę od źródeł drgań zewnętrznych pochodzących np. z innych maszyn i urządzeń znajdujących się w pobliżu. W tym celu zielone roboty zostały umieszczone na masywnych cokołach, spełniających funkcje usztywnienia konstrukcji oraz tłumienia drgań zewnętrznych. Rozwiązanie to wprowadza jednak dodatkową masę do urządzenia. I tak w przypadku robota CR-35iA jego całkowita masa wynosi 990 kg. Warto również zauważyć, że coboty z serii CR posiadają możliwość zasilania z sieci 230V. Wyjątkiem



Rysunek 3.9 Roboty współpracujące firmy Fanuc [19]



Rysunek 3.10 Poszycie robota Fanuc CR-35iA [20]

jest tu jedynie największy z cobotów FANUCa, który ze względu na swoje gabaryty oraz duży udźwig wymaga zasilania trójfazowego (tabela 3.3).

Kwestie użytkowe, ze względu na użycie jako bazy robota przemysłowego, nie uległy większym zmianom. Stąd programowanie urządzenia oraz definiowanie punktów odbywa się dokładnie tak, jak w przypadku klasycznych robotów przemysłowych. Wprowadzoną zmianą jest dodanie zakładki konfiguracyjnej „CR Setup” (rysunek 3.11). Dzięki niej użytkownik w graficzny sposób przeprowadzony jest przez konfigurację urządzenia. W jej ramach wykonywane są następujące czynności:

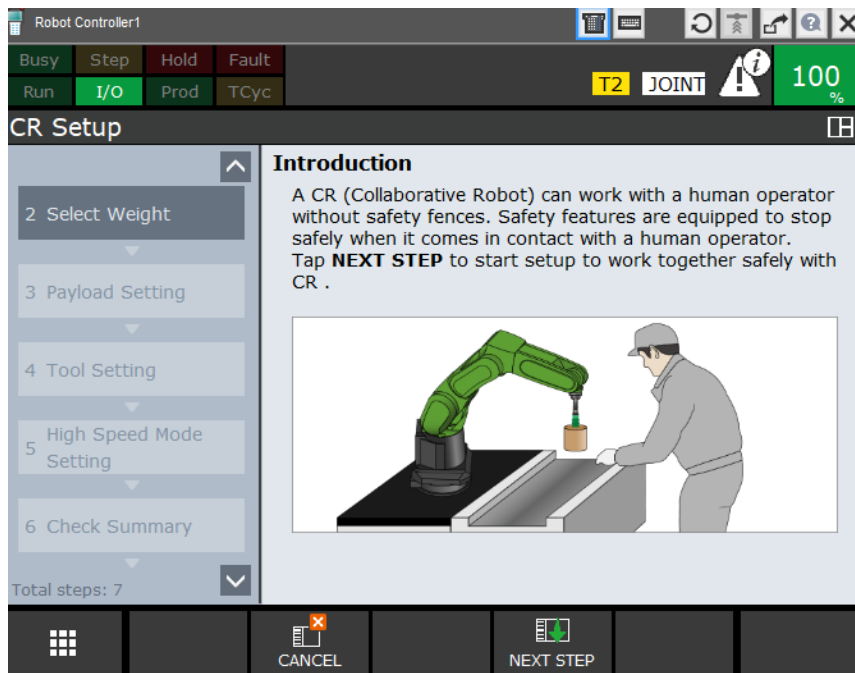
- definiowanie obciążenia (z detalem oraz bez),
- definiowanie przestrzeni bezpieczeństwa dla funkcji contact – stop,
- definiowanie długości narzędzia,
- włączenie lub wyłączenie trybu dużej prędkości (do 750mm/s – urządzenie pracuje jak standardowy robot przemysłowy).

Dla zapewnienia bezpieczeństwa, podobnie jak w grupie cech użytkowych, producent skorzystał ze sprawdzonych rozwiązań. Do zapewnienia kooperacji z człowiekiem bez wprowadzania zagrożenia, FANUC użył zestawienia systemów wbudowanych w cobota oraz zewnętrznego systemu DCS (Dual Check Safety) [21]. Systemy wbudowane w robota to m.in.: kontakt stop, korekcja ręczna, ruch wycofania. System DCS z kolei zapewnia takie funkcje jak tworzenie wirtualnych barier czy kontroli pozycji oraz prędkości robota. Metody te są certyfikowane zgodnie z normą ISO 10218-1 i przedstawione w tabeli 3.4. Wszystkie parametry potrzebne do skonfigurowania wymienionych funkcji znajdują się w ustawieniach systemu DCS (rysunek 3.12).

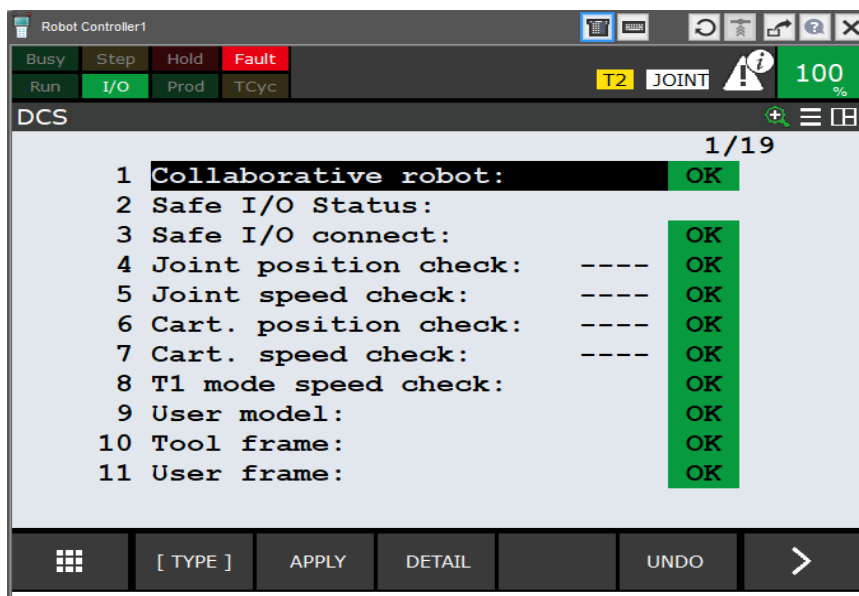
Tabela 3.4 Głównie, konfigurowalne systemy bezpieczeństwa robotów serii CR firmy Fanuc

Numer funkcji	Funkcja	Opis
0	Wyłączenie bezpieczeństwa	Uruchamiane przez wyłącznik bezpieczeństwa na kontrolerze
1		Uruchamiane przez zewnętrzny wyłącznik skonfigurowany z wejściem bezpieczeństwa
2	Kontakt stop	Uruchamiane przy przekroczeniu wartości progowej, przez siły zewnętrzne działające na robota
3	Korekcja ręczna	Sterowanie robota zapewnia ręczną korekcję pozycji osi J1 oraz J2 robota podczas pracy w trybie automatycznym
4	Ruch wycofania	Przytrzaśnięcie kończyny operatora przez narzędzie, wywołuje wycofanie w osi Z o zdefiniowaną wartość
5	Kontrola wejść/wyjść bezpieczeństwa	Kontrola zatrzymania przez zewnętrzne urządzenia
6	Kontrola pozycji osi	Przekroczenie limitu pozycji osi powoduje zatrzymanie

7	Kontrola prędkości osi	Przekroczenie prędkości osi powoduje zatrzymanie
8	Kontrola pozycji we współrzędnych kartezjańskich	Przekroczenie limitu pozycji we wsp. kartezjańskich powoduje zatrzymanie
9	Kontrola prędkości we współrzędnych kartezjańskich	Przekroczenie prędkości dla pozycji we wsp. kartezjańskich powoduje zatrzymanie
10	Kontrola prędkości dla trybu T1	Przekroczenie prędkości powoduje zatrzymanie
11	Kontrola kontaktu z narzędziem	Użytkownik definiuje gabaryty narzędzia, które następnie zostaje pokryte wirtualną barierą. Narzędzie to traktowane jest jako część robota. Pojawienie się narzędzia w strefie bezpieczeństwa powoduje zatrzymanie
12	Kontrola zdefiniowanego obszaru	Użytkownik definiuje obszar, który następnie zostaje pokryty wirtualną barierą. Obszar ten traktowany jest jako część robota. Pojawienie się narzędzia w strefie bezpieczeństwa powoduje zatrzymanie



Rysunek 3.11 Konfiguracja robota FANUC CR-35iA



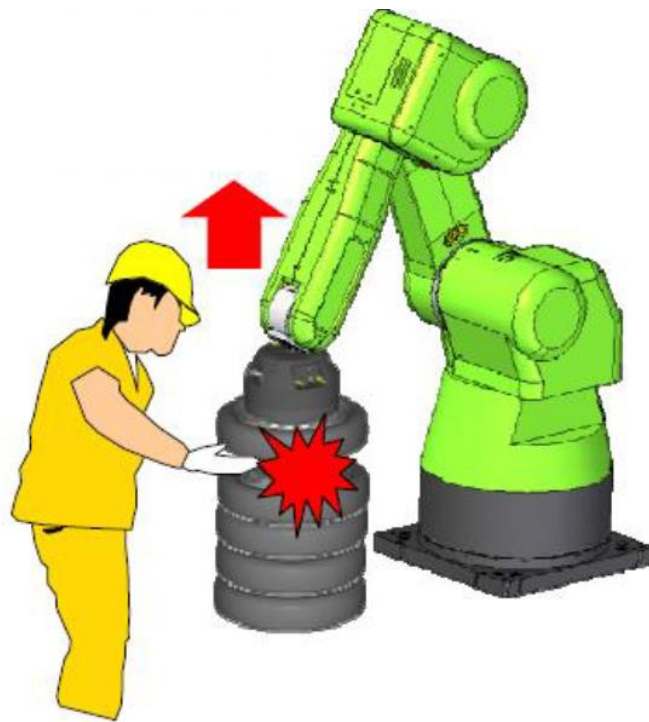
Rysunek 3.12 Konfiguracja systemu DCS robota CR-35iA

Poza systemami, którymi zarządza DCS, coboty Fanuca wyposażone są w kilka autorskich metod uniknięcia kolizji z człowiekiem. Są to przede wszystkim: wirtualne bariery, zatrzymanie poprzez kontakt, ręczna korekcja osi oraz odjazd narzędzia przy kolizji. Wirtualne bariery obejmują całego robota wraz z aktuatorem oraz detalem. Takie rozwiązanie zabezpiecza przed wkroczeniem tych części w zdefiniowane strefy wyłączone z obszaru pracy oraz strefy kooperacji. W związku z tym nie wystąpi sytuacja, w której któryś z elementów robota znajdzie się w danej strefie, pomimo zachowania pozycji punktu TCP. Warto także zauważyć, że odległość od wirtualnej bariery po przekroczeniu której nastąpi zatrzymanie, wzrasta wraz ze wzrostem prędkości.

Następną funkcją wbudowaną jest zatrzymanie poprzez kontakt. Jak wspomniano na wstępie, zielone roboty posiadają wbudowany w podstawę czujnik siły i momentu. Dzięki niemu każda siła, która zadziała z zewnątrz na urządzenie zostanie wykryta, a gdy przekroczy wartość krytyczną (do 150N) nastąpi zatrzymanie robota. Warto również wspomnieć, że ta kontrola dotyczy także wszystkich części składowych robota, a czułość sensora pozwala wykryć nawet dotknięcie palcem. Po takim zatrzymaniu, gdy zewnętrzne obciążenie ustanie, robot wznowi pracę automatycznie. Zielone roboty posiadają ponadto możliwość ręcznej korekcji położenia osi J1 oraz J2. Taka korekcja może odbywać się podczas pracy automatycznej cobota i wykorzystywana jest do odepchnięcia robota w przypadku ewentualności wystąpienia kolizji (rysunek 3.13). Robot reaguje zwolnieniem hamulców w podanych osiach i wykonuje ruch w kierunku odepchnięcia, umożliwiając „ucieczkę” operatora ze strefy kolizji. W podobny sposób działa funkcja wycofania. Robot po wykryciu kolizji na drodze aktuatora wycofuje się na zadaną wysokość. Ta metoda chroni przed zakleszczeniem kończyny operatora w takich aplikacjach jak układanie w stos czy paletyzacja (rysunek 3.14).



Rysunek 3.13 Ręczna korekcja pozycji osi robota z serii CR firmy FANUC [20]



Rysunek 3.14 Funkcja wycofania robota z serii CR firmy FANUC [20]

3.3 KINOVA

Kanadyjska firma KINOVA zaprojektowała coboty JACO oraz MICO (rysunek 3.15). o otwartej architekturze. Manipulatory te występują w różnych konfiguracjach (tabela 3.5) i w każdej z nich posiadają cechy ze wszystkich 3 grup własności cobotów.

Od strony konstrukcyjnej roboty firmy KINOVA cechują się modułową budową, co pozwoliło na uzyskanie wielu konfiguracji. Stąd wyróżniamy model JACO który występuje w układzie 7-, 6- lub 4-osiowej. Dodatkowo robot ten posiada dwa rodzaje piątej osi – sferyczny oraz bezpieczny (rysunek 3.16). Rozwiązanie sferyczne to te znane z innych manipulatorów. Bezpieczne skonstruowane jest w taki sposób, aby nie było możliwości zakleszczenia ręki pomiędzy nadgarstkiem a przedramieniem. Analogicznie model MICO dysponuje 6 lub 4 osiami. Warto zauważyć, że każdy z tych cobotów posiada możliwość nieograniczonego obrotu każdej z osi. Należy także dodać, że do każdego z modeli robotów zaprojektowano zintegrowany chwytak 3 lub 2-palczasty (rysunek 3.15). Chwytały te dostosowują się kształtem do detalu a każdy ich palec ma zamontowane sensory. Kolejną cechą konstrukcyjną jest mała waga urządzenia, rzędu kilku kilogramów. Tak niską masę uzyskano stosując do budowy członów włókno węglowe. Trzeba również nadmienić, że urządzenia te można zasiląć napięciem 24 VDC a pobór mocy jest na poziomie 25W. Te wartości w zestawieniu z wagą cobota pozwalają na użytkowanie manipulatora w połączeniu z wózkiem inwalidzkim czy łazikiem. Ostatnią wartą uwagi własnością robotów KINOVA są wbudowane w nie czujniki, w tym [22]:

- A. osadzone w podstawie:
 - czujnik napięcia zasilania,
 - czujnik temperatury,
 - akcelerometr XYZ,
- B. umieszczone w każdym przegubie:
 - enkoder,
 - czujnik momentu,
 - czujnik prądu,
 - czujnik temperatury,
 - akcelerometr XYZ,
- C. zainstalowane w każdym palcu:
 - czujnik prądu,
 - czujnik temperatury,
 - enkoder.

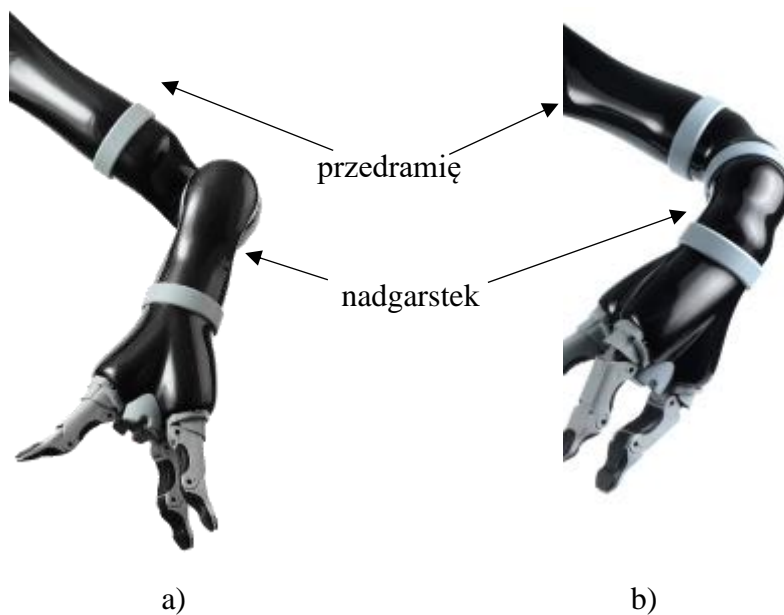
Cechy użytkowe robotów JACO oraz MICO to między innymi możliwość pracy bez wcześniejszej konfiguracji. Coboty nie wymagają inicjalizacji parametrów jak w przypadku innych manipulatorów, a po włączeniu są od razu gotowe do użycia. Sterowanie urządzeniem odbywa się na



Rysunek 3.15 6-osiove roboty MICO oraz JACO firmy KINOVA [14]

Tabela 3.5 Parametry robotów KINOVA

Parametry	JACO 7-DOF	JACO 6-DOF	JACO 4-DOF	MICO 6-DOF	MICO 4-DOF
udźwig	2.1 kg	2.2 kg	3.5 kg	1.5 kg	2.7 kg
zasięg	985 mm	985 mm	750 mm	700 mm	550 mm
powtarzalność	±3.9 mm – pozycji ±1.5° – orientacji	±3.9 mm – pozycji ±1.5° – orientacji	±3.9 mm – pozycji ±1.5° – orientacji	±3.9 mm – pozycji ±1.5° – orientacji	±3.9 mm – pozycji ±1.5° – orientacji
waga	5.5 kg	4,4 kg	3.6 kg	4.6 kg	3.8
zasilanie	18-29 VDC	18-29 VDC	18-29 VDC	18-29 VDC	18-29 VDC
liczba wbudowanych systemów bezpieczeństwa	4 główne	4 główne	4 główne	4 główne	4 główne
programowanie	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – ROS 	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – ROS 	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – ROS 	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – ROS 	<ul style="list-style-type: none"> • online • offline – ROS



Rysunek 3.16 Dwa rodzaje konfiguracji robota KINOVA, a) oś sferyczna b) oś bezpieczna [14]


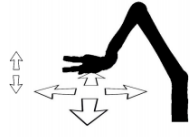

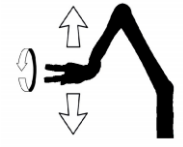

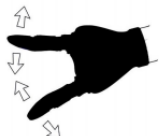

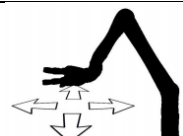

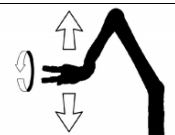



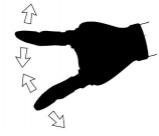


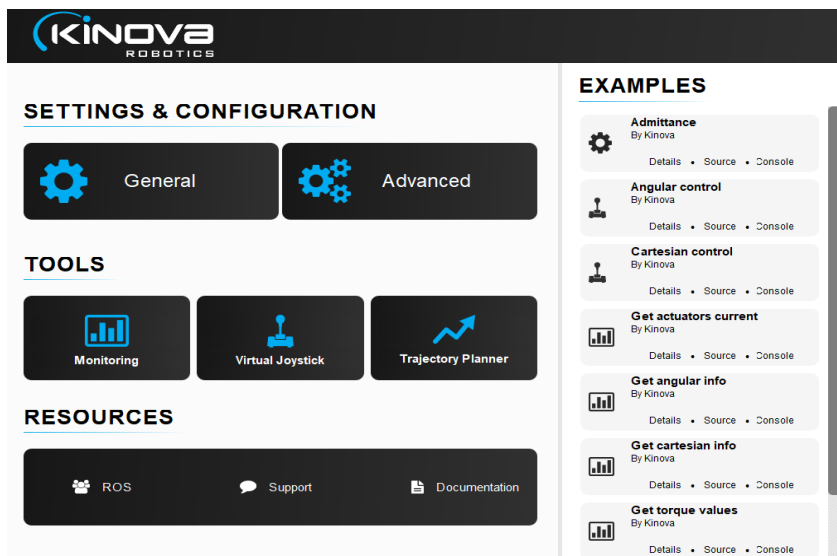
Rysunek 3.17 Kontroler robotów firmy KINOVA [14]

3 sposoby: z wykorzystaniem joysticka, aplikacji KINOVA SDK oraz systemu ROS (Robot Operating System). Joystick (rysunek 3.17) podłączony jest bezpośrednio do robota i pozwala na sterowanie w kilku trybach. Informacja o wybranym trybie przekazywana jest poprzez diody na kontrolerze. Tryby te przedstawiono w tabeli 3.6.

Do programowania robota online używana jest aplikacja KINOVA SDK (rysunek 3.18). System ten służy do definiowania parametrów oraz planowania trajektorii ruchu. Parametry podlegające konfiguracji to np. ręczna inicjalizacja regulatorów PID, definiowanie zerowych pozycji osi czy wybór, którą rękę ma naśladować robot (prawą lub lewą). Planowanie trajektorii odbywa się, jak

Tabela 3.6 Rodzaje trybów sterowania robotami firmy KINOVA za pomocą kontrolera, na podstawie [23]

Nazwa trybu	Oznaczenie na kontrolerze	Opis ruchu
3-osiowe sterowanie		
tryb translacyjny		
Sterowanie nadgarstkiem		
Sterowanie palcami		
2-osiowe sterowanie		
Translacja X-Y		
Translacja Z, orientacja nadgarstka		
Rotacja nadgarstka		
Sterowanie palcami		



Rysunek 3.18 Oprogramowanie KINOVA SDK

w przypadku robotów przemysłowych, przez definicje kolejnych punktów w przestrzeni. W tym celu można użyć kontrolera lub określić w programie o jaki kąt ma obrócić się każda z osi.

KINOVA SDK jest prostą aplikacją a napisane programy ograniczają się do funkcji ruchu. Chcąc projektować bardziej zaawansowane systemy należy posłużyć się platformą programistyczną ROS. Takie rozwiązanie daje dostęp do niskopoziomowego programowania robota w językach C++ oraz Python.

W kwestii zapewnienia bezpieczeństwa coboty firmy KINOVA posiadają systemy związane z kontrolą parametrów ruchu mierzonych bezpośrednio w każdej z osi. Stąd wyróżniamy:

- kontrolę prędkości, robot zostaje zatrzymany po przekroczeniu określonej jej wartości,
- kontrolę położenia, robot zostaje zatrzymany po przekroczeniu określonej pozycji osi,
- kontrolę wibracji, przy przekroczeniu określonego progu drgań uruchamiany jest kontroler wibracji, zwiększający tłumienie regulatora PID, w celu zmniejszenia ich poziomu,
- strefę ochrony, ruch robota zostaje spowolniany przy pozycjach mogących spowodować kolizję ramion urządzenia.

Wymienione zaimplementowane systemy bezpieczeństwa to jedynie część tego co można uzyskać używając wbudowanych w robota sensorów. Ze względu na to, że robot wyposażony został w otwarte środowisko programistyczne ROS funkcje bezpieczeństwa są definiowane przez programistę podczas tworzenia aplikacji. Za pomocą tej platformy uzyskuje się bezpośredni dostęp do wszystkich czujników, napędów oraz innych elementów cobota. Taki wgląd pozwala implementować własne systemy bezpieczeństwa, adekwatne do zaistniałej potrzeby.

4. Przegląd aplikacji współpracujących

Roboty współpracujące znajdują zastosowanie w obszarach niedostępnych dla klasycznej robotyki. Ze względu na ich cechy konstrukcyjne takie jak mała waga czy możliwość zasilania z sieci 230V, wykorzystywane są wszędzie tam, gdzie ograniczeniem jest wielkość dostępnego miejsca. Łatwość programowania oraz elastyczność rozlokowania sprawia, że na wdrożenia robota mogą sobie pozwolić mniejsze firmy, często zmieniające serie produkcyjne. Co więcej wbudowane systemy bezpieczeństwa dają dostęp do projektowania aplikacji kooperacyjnych, gdzie robot pracuje ramię w ramię z człowiekiem. Możliwość definiowania wirtualnych przestrzeni roboczych znosi fizyczne bariery i ogranicza zagrożenia powodowane przez cobota. Prócz zastosowań przemysłowych, coboty coraz częściej spotykane są w obszarach życia codziennego. Lekkie roboty mogą pracować jako asystenci ludzi niepełnosprawnych lub pełnić funkcje rehabilitacyjne. Celem przybliżenia obszarów aplikacji robotów współpracujących, w tym rozdziale opisano wybrane z nich.

Pierwszym przykładem jest zastosowanie cobota w procesie paletyzacji i obsługi maszyn. W firmie Alpha Corporation, zajmującej się produkcją zamków drzwiowych, w celu poprawienia konkurencyjności należało zwiększyć wydajność linii produkcyjnej [24]. Zwiększenie to w klasycznym ujęciu można było dokonać, poprzez wprowadzenie automatów lub cel zrobotyzowanych. Takie rozwiązania wiążą się z całkowitą modernizacją układu linii produkcyjnej oraz dodatkowym zagospodarowaniem dużej przestrzeni. Wytwarzanie takich elementów jak klucze samochodowe czy zamki wymaga częstej zmiany serii produkcyjnej po wprowadzeniu nowych produktów. I tak, każdorazowa aktualizacja wymuszałaby przezbrajanie maszyn z udziałem firm zewnętrznych. Chcąc tego uniknąć zastosowano roboty kolaborujące UR3 oraz UR5 wykonujące proces paletyzacji oraz obsługi wtryskarki (rysunek 4.1). Roboty te pracują bez ogrodzeń a bezpieczeństwo gwarantują ich systemy wbudowane. Rozwiązanie to pozwoliło na zaoszczędzenie miejsca oraz wyeliminowanie konieczności modernizacji zakładu. Łatwość programowania robotów zapewniła elastyczność produkcji i szybkie zmiany wyrobów bez udziału firm zewnętrznych.

Następnym przykładem aplikacji współpracującej jest zastosowanie cobota w procesie montażu. Podczas takich prac często robot przemysłowy nie jest w stanie wykonać wszystkich czynności samodzielnie. W takich przypadkach zręczność operatora jest niezastąpiona, a w celu zrobotyzowanej może być wykonana tylko część zadania. I tutaj znów naprzeciw potrzebom wychodzą coboty, które dzięki strefom kolaboracji mogą pracować przy jednym stanowisku z człowiekiem. Przykładem takiej aplikacji jest wdrożone przez firmę ABB stanowisko montażowe gniazdek elektrycznych z robotem YuMi (rysunek 4.2) [25]. W implementacji tej człowiek przygotowuje wszystkie potrzebne elementy montażu a następnie przekazuje je robotowi. Robot dokończy proces montażu, a następnie oddaje gotowy detal operatorowi. Ten dokonuje sprawdzenia i odkłada prawidłowo złożone gniazdko na przenośnik taśmowy. Takie stanowiska wdraża także firma FANUC jak np. system do montażu silników elektrycznych (rysunek 4.3) [26]. I tak, dla tego zastosowania wybór cobota wiąże się z zaoszczędzeniem przestrzeni oraz zwiększeniem wartości dodanej w procesie.



Rysunek 4.1 Robot UR3 w aplikacji dla Alpha Corporation [24]



Rysunek 4.2 Stanowisko montażowe z zastosowanym robotem ABB YuMi [25]



Rysunek 4.3 Stanowisko montażowe z robotem FANUC CR-35iA [26]



Rysunek 4.4 UR3 jako tester symulatora Boeinga 737 [27]



Rysunek 4.5 Robot KINOVA JACO w aplikacji dla osób niepełnosprawnych [28]

Poza typowymi aplikacjami przemysłowymi robot współpracujący może pełnić funkcje testera urządzeń. Do takiego zastosowania firma Boeing użyła robota UR3 [27]. Cobot duńskiego producenta umieszczony został w kabinie pilota symulatora Boeinga B373 i zaprogramowany do jego obsługi (rysunek 4.4). Test polega na wykonaniu prawidłowo startu, lotu oraz lądowania maszyny. Podczas niego, sprawdzane jest prawidłowe funkcjonowanie oraz wytrzymałość przycisków, pokręteł oraz urządzeń obsługiwanych przez pilota. Zastosowanie robota współpracującego pozwoliło na zapewnienie powtarzalności testów oraz zastąpienie człowieka w ich wykonywaniu.

Również KINOVA dostarcza nowych zastosowań robotów kolaborujących. Jednym z ich asystent osób niepełnosprawnych [28]. Stąd roboty JACO oraz MICO instalowane są w wózkach inwalidzkich (rysunek 4.5). Dla osób z niedowładem rąk codzienne czynności są niemożliwe do

wykonania samodzielnie, co skutkuje uzależnieniem od członków rodziny lub pielęgniarzy. Coboty KINOVy ze względu na możliwość sterowania przez kontroler, pomagają w takich zadaniach jak jedzenie, picie, przenoszenie przedmiotów czy obsługa windy. Stąd roboty nie tylko zwiększają wydajność w zakładach przemysłowych ale także poprawiają jakość życia.

5. Przykładowe aplikacje robotów współpracujących

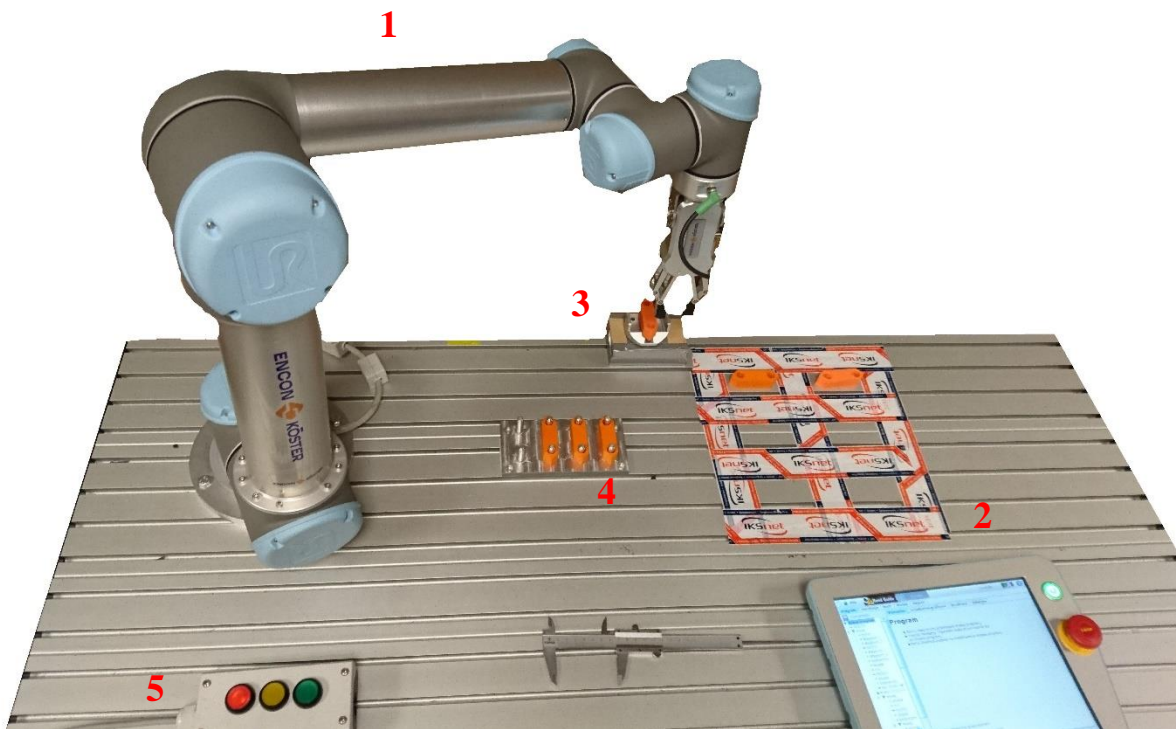
W celu głębszej analizy możliwości zastosowań robotów kolaborujących w tym rozdziale zaprezentowano zaimplementowane wybrane rozwiązania. Do zaprojektowania aplikacji współpracujących użyto robota firmy Universal Robots UR5, symulatora Roboguide z robotem FANUC CR-i35A oraz 6-osioowego cobota KINOVA JACO.

5.1 Universal Robots

Jedną z podstawowych aplikacji projektowanych z użyciem robotów Universal Robots jest obsługa maszyn CNC. Jak wspomniano w rozdziale 4, przy takich aplikacjach roboty współpracujące wykorzystywane są ze względu na możliwość wprowadzenia stref kooperacji oraz zniesienia barier między człowiekiem a robotem. Tak zaprojektowana aplikacja, dzięki zastosowaniu robota kolaborującego, zapewnia możliwość wykonywania przez człowieka czynności manualnych, bezpośrednio przy stanowisku z robotem. W analizowanym przykładzie zostanie zaprogramowana strefa kolaboracji a robot będzie wykonywał pracę wspólnie z operatorem. Zadaniem robota jest pobranie detalu z palety, umieszczenie w obrabiarce, a następnie po obróbce przekazanie operatorowi w strefie kooperacji. Po otrzymaniu detalu operator wykonuje na nim czynności manualne takie jak pomiar, szlifowanie niedokładności itp. Po zatwierdzeniu detalu zwracany jest robotowi, który to przechodzi do jego montażu do zespołu. Stanowisko to przedstawiono na rysunku 5.1. Składa się ono z: 1 – robota UR5, 2 – modelu palety z prefabrykatami, 3 – modelu uchwytu obrabiarki CNC, 4 – zespołu elementów, 5 – przycisków do akceptacji poprawności detalu.

W celu zaprogramowania przedstawionej aplikacji jako współpracującej, należało użyć systemów bezpieczeństwa wbudowanych w robota Universal Robots. Systemy, które użyto, to zdefiniowanie dopuszczalnych sił i prędkości cobota, wirtualne bariery oraz ograniczenie osi. Zdefiniowanie maksymalnych sił i prędkości ma na celu zapewnienie wystarczająco szybkiego zatrzymania robota podczas ewentualnej kolizji. Kolejno z użyciem wirtualnych barier utworzono strefy pracy automatycznej urządzenia oraz strefy kooperacji z człowiekiem. Na koniec ograniczenie zakresu ruchu osi pozwoliło na wyeliminowanie takich położeń członów robota, w których mogłoby wystąpić zakleszczenie ręki operatora.

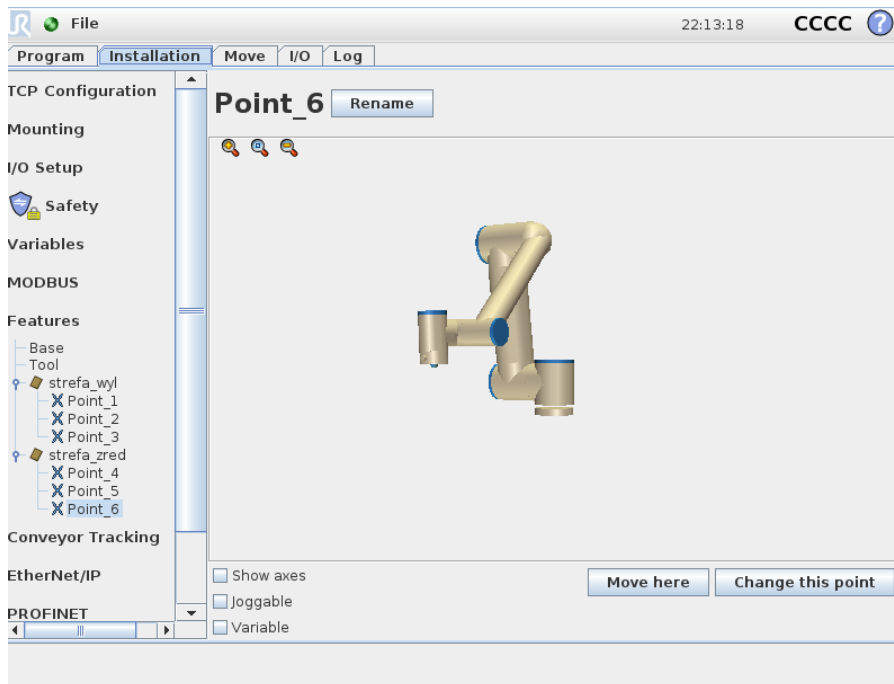
W pierwszej kolejności zaprogramowano wirtualne bariery. W tym celu zdefiniowano 2 płaszczyzny, płaszczyznę ograniczającą stanowisko zrobotyzowane oraz płaszczyznę wyznaczającą strefę kooperacji (rysunek 5.2). Płaszczyzny zostały zdefiniowane przez określenie dla każdej z nich 3 punktów w przestrzeni, wskazanych przez punkt TCP robota. Mając wyznaczone płaszczyzny w ustawieniach bezpieczeństwa cobota zdefiniowano dwie strefy (rysunek 5.3). Pierwsza strefa odgradzała robota od obszarów poza stołem montażowym a przekroczenie jej przez punkt TCP wyzwalalo zatrzymanie bezpieczeństwa. Druga strefa była strefą współpracy z człowiekiem – po wkroczeniu punktu TCP w jej obszar robot pracował z ograniczoną prędkością a jego czułość na wystąpienie kolizji została zwiększona (rysunek 5.4).



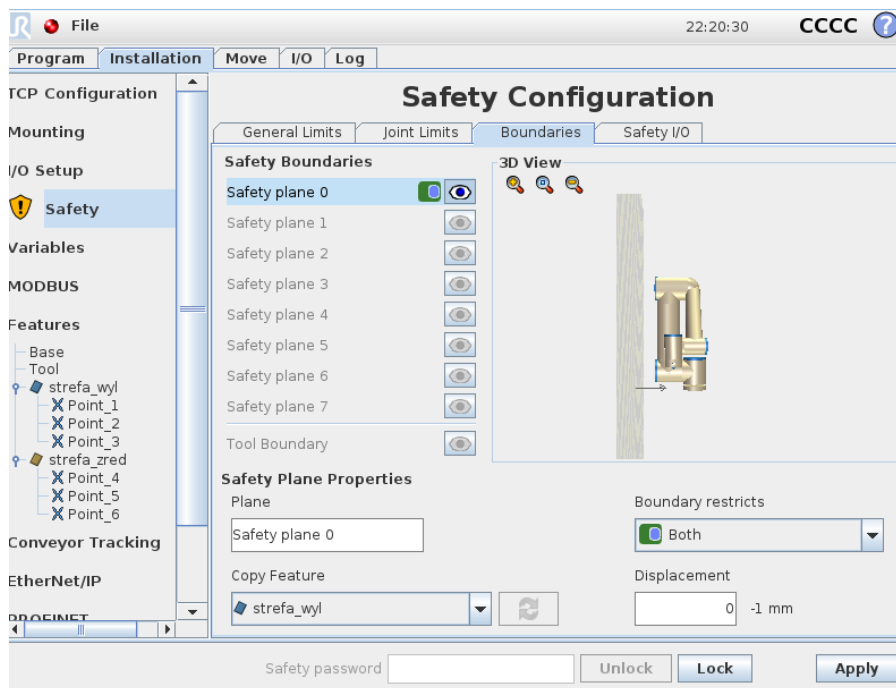
Rysunek 5.1 Stanowisko do symulacji obsługi obrabiarki CNC ze strefą kooperacji

Kolejną funkcją, którą należało skonfigurować były ograniczenia położenia osi. W przypadku poruszania się robota bezpośrednio przy operatorze może dojść do przytrzaśnięcia ręki przez sąsiednie przeguby robota, co obrazowo pokazano na rysunku 5.5. Aby nie dopuścić do takiej sytuacji zmierzono położenia poza którymi może dojść do przytrzaśnięcia, a następnie je ograniczono (rysunek 5.6). Po ograniczeniu osi sterownik robota redukuje dostęp wyłącznie do położeń niezablokowanych. Dostęp ograniczany jest także przy prowadzeniu robota ręką.

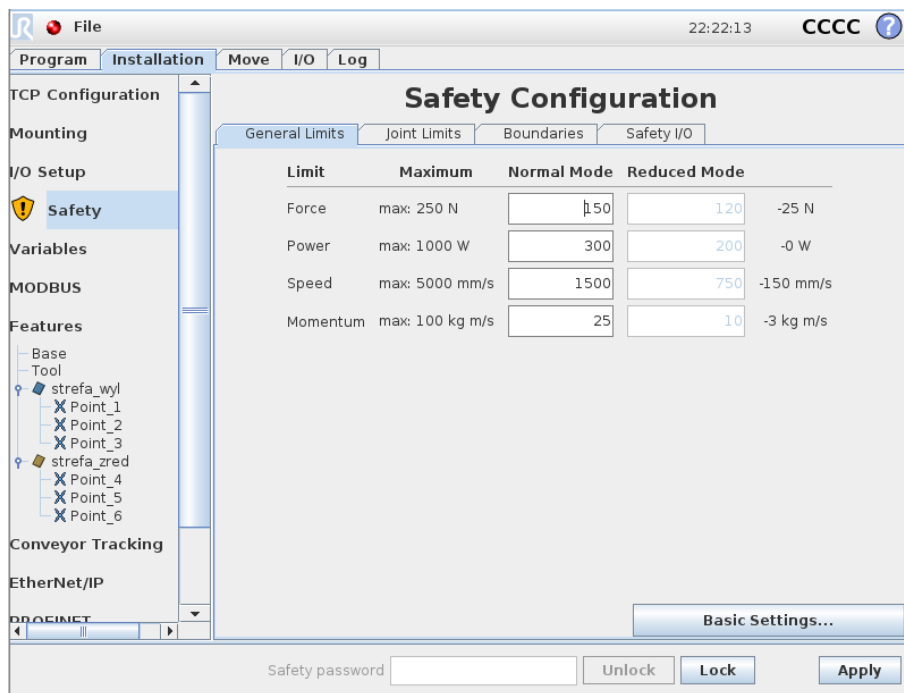
Po skonfigurowaniu systemów bezpieczeństwa, wydzieleniu stref oraz ograniczeń przegubów przystąpiono do pisania programu. Do zaprogramowania robota użyto bloków wybieralnych używając funkcji ruchu oraz obsługę wejść cyfrowych do komunikacji przycisków z cobotem. W celu zaprogramowania punktów wykorzystano prowadzenie ręką. Takie podejście cechuje się niewielką precyzją, w związku z czym funkcjonalność tą używano jedynie do zgrubnego pozycjonowania chwytaka. Po takiej operacji za pomocą panelu operatora ustalono dokładne położenia. Po zaprogramowaniu zadania dla robota, uruchomiono program w celu przetestowania kooperacji robota z człowiekiem. Robot w strefie pracy automatycznej wykonywał swoje zadania szybko i precyzyjnie. Po odbiorze elementu z obrabiarki aktuator cobota wkraczał w strefę współpracy, gdzie zauważalne było znaczne zmniejszenie jego prędkości. W takim trybie robot natychmiast zareagował na zasymulowaną kolizję uruchamiając zatrzymanie kategorii 0 (rysunek 5.7).



Rysunek 5.2 Definiowanie płaszczyzn, robot UR5



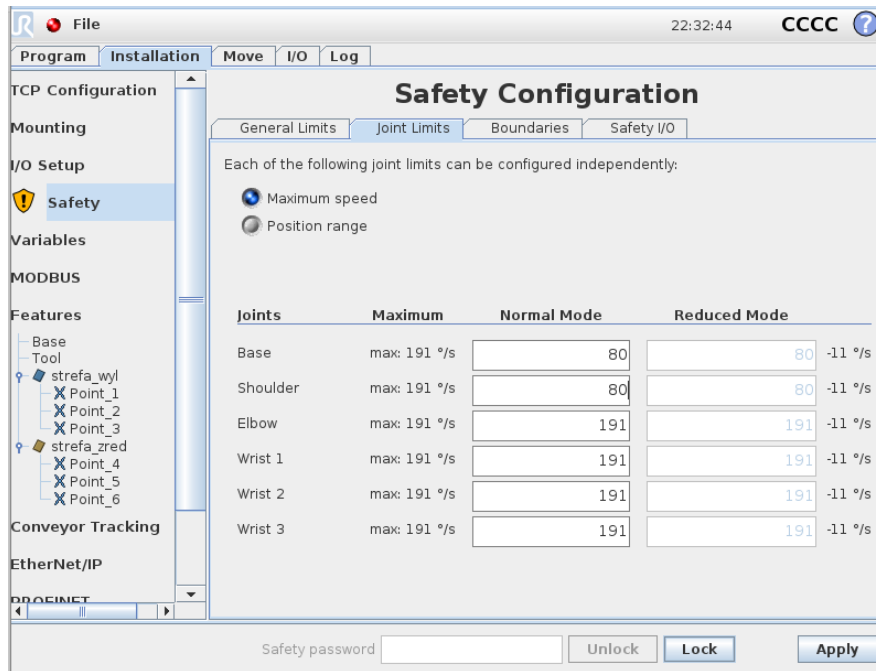
Rysunek 5.3 Definiowanie barier bezpieczeństwa, robot UR5



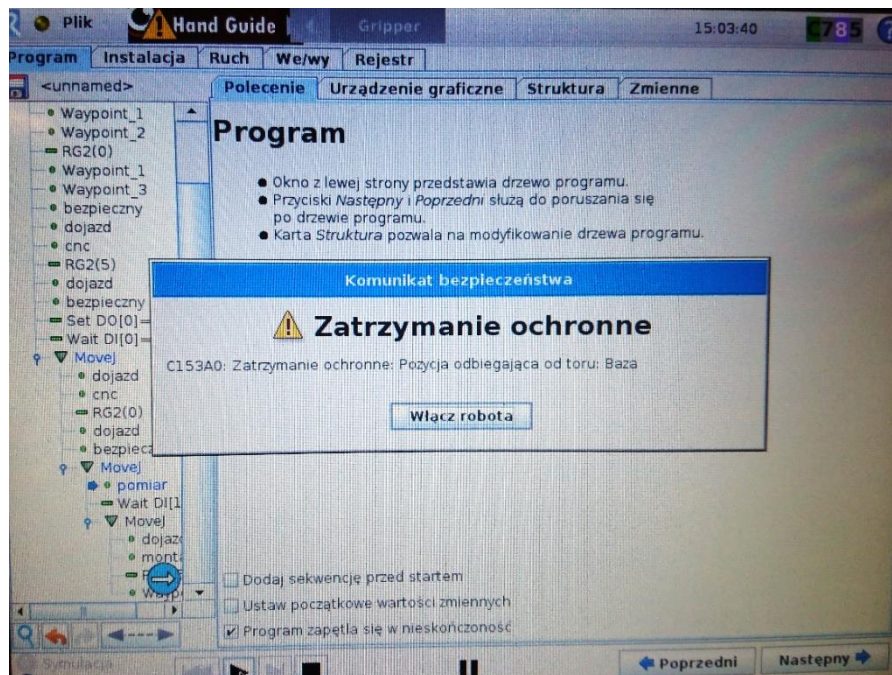
Rysunek 5.4 Konfiguracja dopuszczalnych wartości parametrów robotów (sił, mocy, prędkości oraz momentów), robot UR5



Rysunek 5.5 Symulowane zakleszczenie ręki, robot UR5



Rysunek 5.6 Konfiguracja ograniczeń osi, robot UR5



Rysunek 5.7 Zatrzymanie bezpieczeństwa, robot UR5

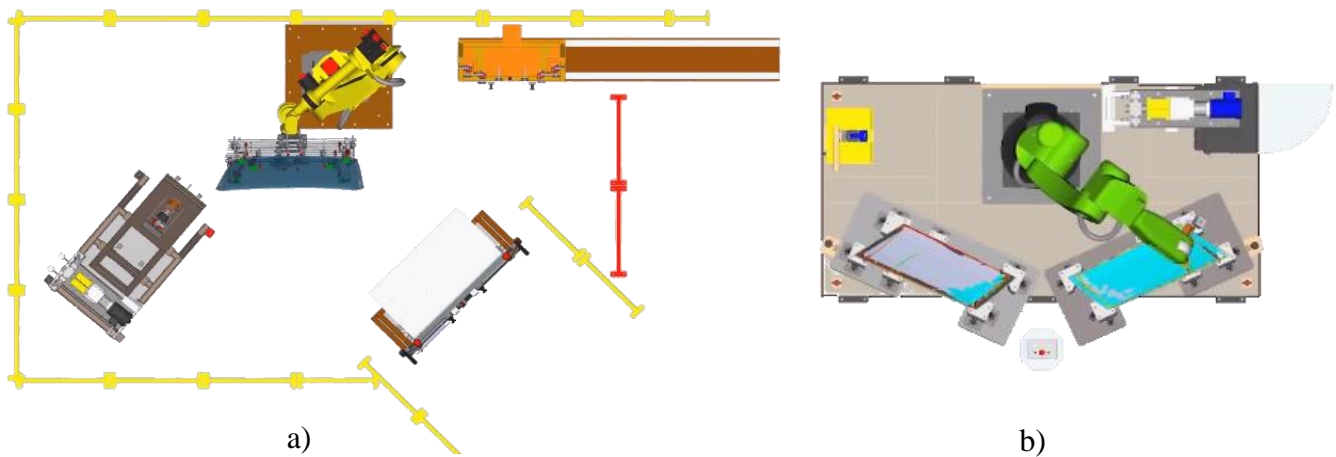
5.2 FANUC

W podrozdziale przedstawiono aplikację zrobotyzowanego klejenia szyby samochodowej. W aplikacji tej poprzez użycie cobota zredukowano o 50% rozmiary stanowiska, wymaganego przy klasycznym rozwiązaniu (rysunek 5.8). Aplikacja została zaprojektowana w programie Roboguide a do zamodelowania funkcji bezpieczeństwa użyto systemu DCS. Funkcje wykonywane przez robota to nakładanie ścieżki kleju na szybę, na jednym ze stanowisk. Proces ten uruchamiany jest za pomocą przycisku skonfigurowanego jako wejście w robocie. Operator ma za zadanie zainstalować szybę na jednym ze stanowisk i uruchomić urządzenie. Następnie robot rozpoczyna nakładanie kleju w czasie, w którym operator przygotowuje drugie stanowisko. System zrobotyzowany składa się z (rysunek 5.9): 1 – robota FANUC CR 35iA, 2 – szafy sterowniczej, 3 – stanowisk z szybami samochodowymi, 4 – konsoli do obsługi robota, 5 – stojaków z szybami.

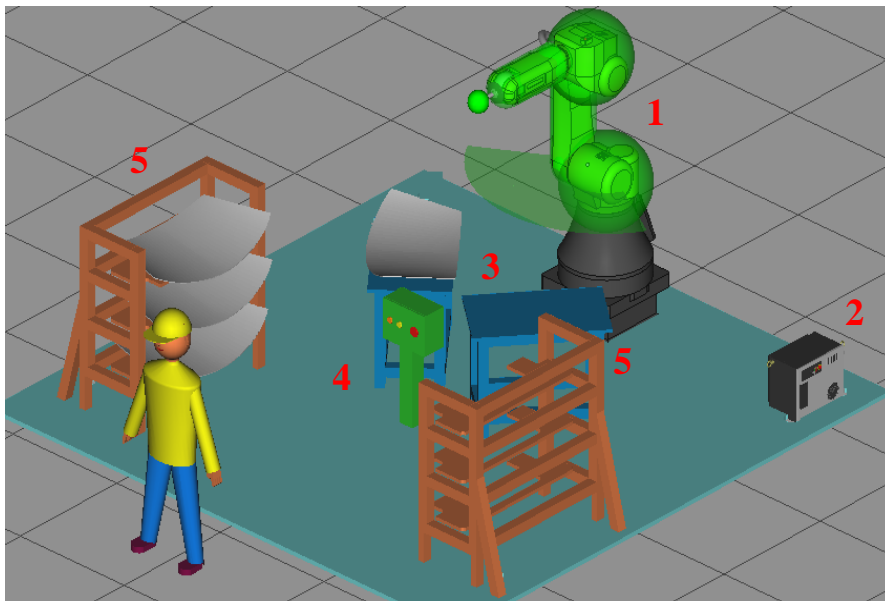
Celem zaprojektowania aplikacji współpracującej skonfigurowano system DCS oraz zaprogramowano ścieżkę robota. Systemy bezpieczeństwa, które użyto to: strefy bezpieczeństwa, ograniczenie pozycji osi, kontakt stop, ograniczenie prędkości. Aby robot mógł pracować bez ograniczeń, zastosowano wirtualne bariery oraz ograniczenie osi, które wyznaczały obszar pracy robota. W tych obszarach aktywny system kontakt stop kontroluje wystąpienie ewentualnych kolizji a kontrola prędkości zapewnia odpowiedni czas zatrzymania robota.

Na wstępie skonfigurowano wymienione wcześniej funkcje systemu DCS dla robotów współpracujących (rysunek 5.10). W systemie tym, po pierwsze zdefiniowano limity siły, powyżej których robot zostanie zatrzymany oraz po których użyje funkcji wycofania bezpieczeństwa. Limity te ustawiono na poziomie 100N oraz 200N. Ograniczono także ogólną prędkość robota do bezpiecznych $20 \frac{cm}{s}$. Kolejno w zakładce kontroli pozycji osi, ustalono bezpieczne położenie osi J1 ($<-60^{\circ};60^{\circ}>$). Następnie w celu wyznaczenia obszaru pracy robota skorzystano z kontroli pozycji w układzie kartezjańskim i wydzielono przestrzeń, w której cobot będzie działał w trybie pracy automatycznej. Każde przekroczenie wirtualnej bariery wywoła awaryjne zatrzymanie robota. Jak widać na wizualizacji na rysunku 5.9, robot pokryty jest zielonym bryłami. Bryły te poszerzają model robota, aby skrócić czas reakcji zatrzymania, przy przekroczeniu przez robota wirtualnej bariery. Ponieważ bryły te pokrywają jedynie model robota, aby system działał poprawnie należało zdefiniować taką bryłę, także wokół narzędzia. W tym celu utworzono obramowanie narzędzia w zakładce „tool frame”. Po takiej konfiguracji ruch maszyna został systemowo ograniczony, co pozwoliło na zrezygnowanie z fizycznych ogrodzeń.

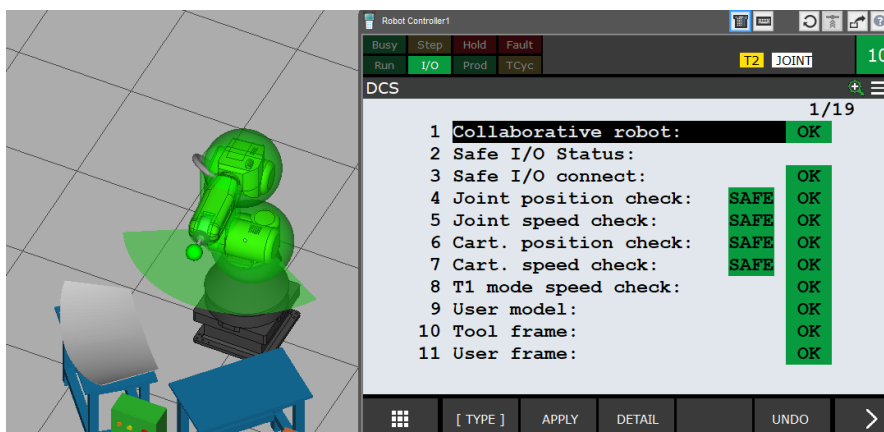
Mając skonfigurowany system DCS przystąpiono do programowania ścieżki robota. CR 35iA jest wyposażony w kontroler używany w robocie przemysłowym FANUC M-20iA/35M, stąd programowanie zielonego robota nie różni się od tego stosowanego w klasycznych urządzeniach. Podczas tworzenia programu wyznaczono punkt dojazdu do szyby oraz szereg punktów tworzących ścieżkę nakładania kleju. Tak opracowany program wywoływany jest poprzez wejście cyfrowe 1 lub 2 w zależności od tego, które stanowisko jest aktualnie przygotowane.



Rysunek 5.8 Model stanowiska do robotyzowanego klejenia szyby samochodowej, a) stanowisko z klasycznym robotem przemysłowym, b) stanowisko z robotem współpracującym. [29]



Rysunek 5.9 Model stanowiska robotyzowanego z robotem FANUC CR 35iA



Rysunek 5.10 Konfiguracja systemu DCS dla robota FANUC CR 35iA

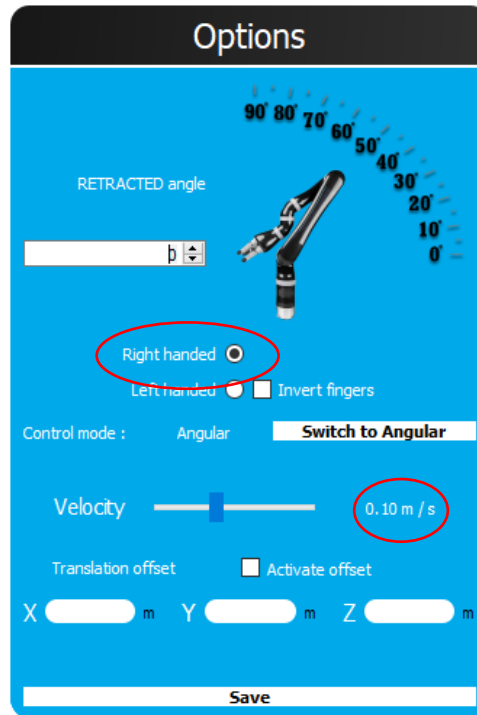
5.3 KINOVA

Roboty współpracujące firmy KINOVA zostały zaprojektowane między innymi do tego, by pomagać osobom niepełnosprawnym w wykonywaniu codziennych czynności. Stąd, w celu weryfikacji ich przydatności w takim zadaniu zaprogramowano aplikacje, które mogłyby być wykorzystywane przez osobę z niesprawnymi rękoma. Aplikacje te to: obsługa urządzenia sprzętu domowego (wieża audio), nalewanie wody do szklanki oraz podnoszenie zrzuconych sztućców. Przedstawione w podrozdziale scenariusze działają bez sprzężenia zwrotnego i posłużyły jedynie do obserwacji ruchu i zachowania ramienia². Misje zostały zaprogramowane z użyciem 6-osioowego robota JACO oraz programu KINOVA SDK. Przed przystąpieniem do implementacji zdefiniowano parametry ruchu robota. W ustawieniach wybrano naśladowanie prawej ręki oraz nastawiono prędkość na $0.10 \frac{m}{s}$ (rysunek 5.11).

Pierwszym zadaniem robota była obsługa sprzętu audio. W aplikacji KINOVA SDK zaplanowano trajektorie ruchu urządzenia dla obsługi przycisków, pokręteł oraz stacji dysków urządzenia audio (rysunek 5.12). Do wyznaczania punktów użyto kontrolera a utworzona ścieżka ruchu przebiegała następująco. Cobot z pozycji domowej ustawił się na wprost przycisku włączania więzy. Następnie po zmniejszeniu prędkości ruchem liniowym, nie wywierając dużego nacisku uruchomił urządzenie. Później aktuator został skierowany w stronę pokrętła głośności, zgrubnie ustawiając swoją pozycje. Chwytnak zaciska się na pokrętło i dzięki ruchowi ostatniej osi zwiększa głośność. Analogicznie robot obsługuje stacje dysków pobierając płytę z otwartego pudełka. Podczas wykonywania programu zaobserwowano, że 3-palczysty chwytak dostosowywał się do kształtów pokrętła oraz płyty CD. Palce chwytaka ustawiały się w taki sposób, aby kompensować niedokładności pozycjonowania. Pomimo tych niedokładności, kompensacja pozwoliła na swobodny obrót pokrętła głośności wieży audio (rysunek 5.13).

Kolejnymi zadaniami było chwytanie przedmiotów codziennego użytku takich jak, butelka z wodą oraz sztućce (rysunek 5.14). Zadaniem robota było nalanie wody do szklanki oraz podniesienie sztućców z podłogi. Dla tej aplikacji utworzono program do chwytania przedmiotu oraz za pomocą sterowania kontrolerem w czasie rzeczywistym podnoszono przedmioty z różnych miejsc. Manipulowanie ramieniem w czasie rzeczywistym było intuicyjne i szybko udawało się prawidłowo spozycjonować aktuator. Dodatkowo jego własność dopasowywania kształtu do przedmiotu znacznie ułatwiła chwytanie.

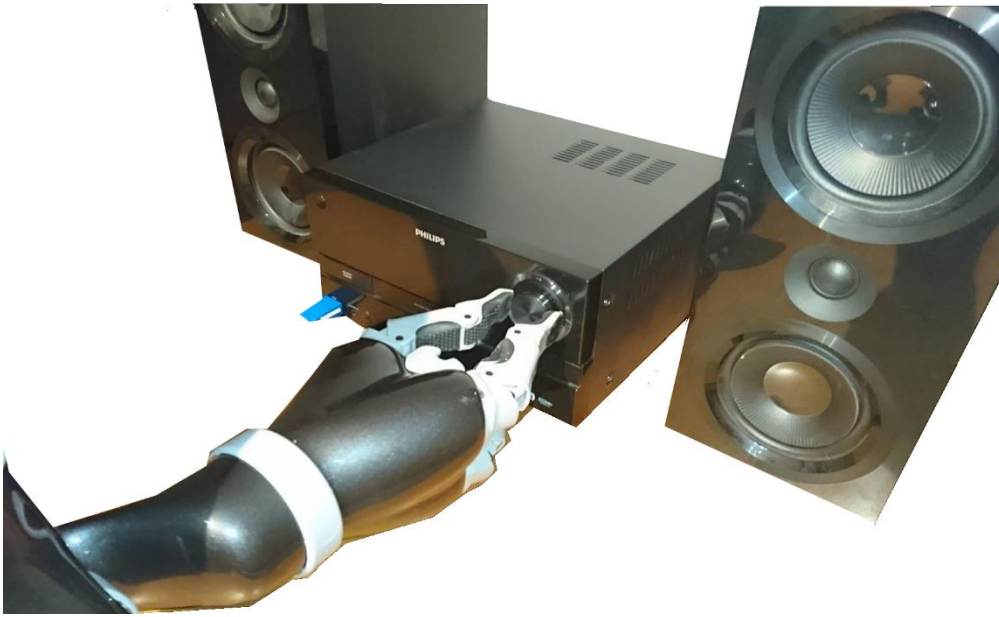
² Chcąc zaimplementować w pełni funkcjonalne zadania, należałoby użyć systemu wizyjnego oraz platformy programistycznej ROS.



Rysunek 5.11 Ustawienia parametrów ruchu robota JACO



Rysunek 5.12 Planowanie trajektorii robota KINOVA JACO



Rysunek 5.13 Obsługa wieży audio przez robota JACO



Rysunek 5.14 Chwywanie przedmiotów codziennego użytku przez robota JACO

6. Podsumowanie

Roboty współpracujące posiadają wiele własności, które różnią je od klasycznych robotów przemysłowych. Dzięki cechom takim jak łatwe programowanie czy mała waga coboty znajdują zastosowanie w obszarach niedostępnych dla klasycznej robotyki. Przeznaczenia te, jak przedstawiono w rozdziale 5, pozwalają między innymi na pracę robota ramię w ramię z człowiekiem, zniesienie fizycznych barier bezpieczeństwa jak i pomoc osobom niepełnosprawnym. Wszystkie te aspekty pokazują, że roboty kolaborujące są nowym motorem napędowym rozwoju robotyki. W tym rozdziale podsumowano podjęte w pracy rozważania oraz nakreślono kierunki dalszego rozwoju cobotów.

W celu zestawienia różnych konstrukcji cobotów, w poprzednich rozdziałach szczegółowo przedstawiono 3 z nich : Universal Robots, FANUC CR-35iA oraz KINOVA JACO. Ich ogólne własności podzielono na 3 grupy: cechy konstrukcyjne, użytkowe oraz odpowiadające za bezpieczeństwo. Bazując na tym podziale można porównać cechy omawianych urządzeń w sposób zaproponowany w tabeli 6.1. Warto zauważyć, że proces konstruowania robotów współpracujących może przebiegać dwojako. Może polegać on na projektowaniu zupełnie nowych urządzeń, kładąc nacisk na zapewnienie jak najlepszej kolaboracji z człowiekiem. Podejście to zapewnia elastyczność oraz małą wagę maszyny kosztem mniejszej sztywności, prędkości oraz powtarzalności. Nowa konstrukcja gwarantuje odświeżony interfejs programowania oraz łatwość przezbierania. Z drugiej strony, stosując tylko modyfikacje klasycznych robotów przemysłowych, uzyskuje się lepsze parametry ruchu. Jednakże wadą takich cobotów jest to, że charakteryzują się one stosunkowo dużą masą a metody ich programowania pozostają skomplikowane. W związku z tym przy projektowaniu systemu zrobotyzowanego należy zastanowić się, które parametry robota są bardziej pożądane i na tej podstawie wybrać odpowiednie urządzenie.

Tabela 6.1 Porównanie cech wybranych cobotów

Parametry	Universal Robots	FANUC CR	KINOVA JACO
udźwig	3 – 10 kg	4 – 35 kg	1,5 – 3.5 kg
masa	11 – 29 kg	48 – 990 kg	3,6 – 5.5kg
powtarzalność	±0.1 mm	±0.02 – 0.08 mm	±3.9 mm
konstrukcja bez ostrych krawędzi	TAK	TAK	TAK
konieczność kotwienia	NIE	TAK	NIE
łatwość programowania	TAK	NIE	TAK
szybka konfiguracja	TAK	TAK	TAK
wbudowane systemy bezpieczeństwa	TAK	TAK	TAK
Wbudowane dodatkowe sensory	NIE	Częściowo	TAK

Wyposażenie robotów przemysłowych w wyszczególnione powyżej cechy oraz systemy pozwala na wprowadzenie ich do nowych obszarów. Przede wszystkim są to małe i średnie przedsiębiorstwa, których nie stać na modernizację całych linii produkcyjnych oraz usługi integratorów. Przykładowa aplikacja zaprojektowana z użyciem urządzenia FANUC CR-35iA pokazuje, że cela zrobotyzowana z użyciem cobota zajmuje o połowę mniej miejsca w porównaniu z klasycznym rozwiązaniem. Symulacja kolejnego systemu z wykorzystaniem robota kolaborującego UR wskazuje na korzyści związane z równoczesną pracą robota z człowiekiem oraz łatwością programowania. W tym przypadku przy jednym stanowisku robot może wykonywać prace powtarzalne i monotonne, a operator te wymagające ludzkiej zręczności. Ostatnia implementacja z manipulatorem KINOVA JACO demonstruje możliwość wprowadzenia robota poza przemysłem. Cobot jest tutaj asystentem człowieka wykonującym codziennie czynności. Takich zastosowań jest o wiele więcej a korzyści z nich wynikające to:

- wymagana mniejsza ilość miejsca,
- stanowiska bez fizycznych barier,
- brak konieczności używania dodatkowych urządzeń bezpieczeństwa,
- połączenie pracy robota i człowieka na jednym stanowisku,
- szybkość przezbrajania,
- łatwość obsługi i programowania.

Analizując obszary w których stosowane są roboty kolaborujące można zauważyć, że ich rozwój zmierza w dwóch głównych kierunkach: zapewnienia coraz lepszej kooperacji z człowiekiem oraz łatwiejszego programowania. W przypadku kooperacji pożądane w przyszłości będzie inteligentne zachowanie się robota w przypadku zagrożenia. Systemy bezpieczeństwa powinny nie tylko zapewniać mniejsze obrażenia przy kolizji, ale im zapobiegać. Udoskonalając aktualne procedury należałoby zastosować możliwość przewidzenia zachowania człowieka, które mogłoby doprowadzić do kolizji. Chcąc usprawnić proces programowania kluczowe mogłoby być opracowanie systemu odtwarzania ruchów operatora. Do takiej metody można użyć sztucznej inteligencji, metod uczenia maszynowego czy sieci neuronowych. Rozwiązanie to pozwoliłoby na jeszcze szybsze przeprogramowanie urządzeń i większą samodzielność firm przy projektowaniu aplikacji.

Podsumowując, wprowadzone na rynek roboty współpracujące różnią się w zależności od producentów. Różnice te wynikają z odmiennych podejść oraz indywidualnych możliwości każdej z firm. Z jednej strony, powstają nowe konstrukcje, które wpisując się wszystkimi cechami we wzorzec cobota, ustępują równocześnie parametrami klasycznym robotom przemysłowym. Z drugiej strony, doposażenie sprawdzonych konstrukcji o dodatkowe systemy bezpieczeństwa pozwala na ich współpracę z człowiekiem przy zachowaniu dobrych parametrów ruchu. Tak zmodyfikowane urządzenia nie będą jednak posiadały wszystkich cech cobota. Różnorodność koncepcji robotów kolaborujących sprawia, że mogą być one wykorzystywane w niemal każdej gałęzi przemysłu, a także poza nim. Takie aplikacje jak montaż, obsługa maszyn CNC, testowanie urządzeń czy pomoc niepełnosprawnym, to tylko część możliwości wykorzystania robotów współpracujących. W przyszłości coboty te, mogą znaleźć większe zastosowanie poza przemysłem, w obszarach o wymaganej większej interakcji z człowiekiem. Takim miejscem może być np. salon masażu, gdzie robot kontrolujący siłę nacisku mógłby wykonywać masaż. Kolejnym

możliwym zastosowaniem jest manipulator umieszczony na platformie mobilnej będący ochroniarzem takich miejsc jak elektrownie czy magazyny substancji niebezpiecznych. Zaimplementowanie w roboty nowych rozwiązań, takich jak sztuczna inteligencja czy sieci neuronowe pozwoli na automatyzację czynności często zmiennych. W aplikacjach tych, robot mógłby sam dostosowywać swoje zachowanie do aktualnie wymaganego zadania lub przewidywać zachowanie człowieka z którym współpracuje. Takimi obszarami może być rzemiosło czy produkcja na zamówienie. Ciągły rozwój nowych systemów bezpieczeństwa, jak i metod sterowania robotów z pewnością pozwoli na wprowadzanie takich aplikacji w niedalekiej przyszłości a roboty kolaborujące będą spotykane już nie tylko w halach produkcyjnych.

7. Bibliografia

- [1] International Federation of Robotics, *Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots*, https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf
- [2] PN-EN ISO 8373:2001, *Roboty przemysłowe – Terminologia*
- [3] Financial Tribune, *Slow Rise of Robots in US*, <https://financialtribune.com/articles/world-economy/67991/slow-rise-of-robots-in-us>
- [4] Joanna Kulik, Łukasz Wojtczak, *Światowe trendy robotyki a wyzwania technologiczne polskich MŚP*, *Pomiary Automatyka Robotyka*, R. 19, Nr 4/2015, 79–86
- [5] *COBOTS, US patent 5,952,796*
- [6] *Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn*
- [7] Wojciech Muszyński PWR, *wykład – Bezpieczeństwo systemów zrobotyzowanych*, http://rab.ict.pwr.wroc.pl/~wojtek/Robotyzacja/wyk%b3ad_Bezpieczenstwo%20w%20systemach%20zrobotyzowanych.pdf (link musi być ?)*
- [8] ISO/TS 15066:2016, *Robots and robotic devices – Collaborative robots*
- [9] Universal Robots, *Safety Function Descriptions*, <https://www.universal-robots.com/media/1800058/ur-g3-safety-functions-20170509.pdf>
- [10] Universal Robots, *Robot UR5*, <https://www.universal-robots.com/>
- [11] ABB, *Robot Yumi*, <http://new.abb.com/products/robotics/pl/roboty-przemyslowe/yumi>
- [12] KUKA, *Robot LBR iiwa*, <https://www.kuka.com/pl-pl/produkty-i-us%C5%82ugi/systemy-robot%C3%B3w/roboty-przemys%C5%82owe/lbr-iiwa>
- [13] FANUC, *Collaborative robots*, <https://www.fanuc.eu/tr/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots>
- [14] KINOVA ROBOTICS, *Robotic arms series* <https://www.kinovarobotics.com/en/products/robotic-arm-series>
- [15] Encon-Koester, <http://encon-koester.com/produkt/robot-przemyslowy-ur5/>
- [16] Universal Robots, *User manual UR5*
- [17] Encon-Koester, *materiały wewnętrzne*
- [18] TÜV NORD Certificate, <https://www.universal-robots.com/media/1528658/tuv-nord-certificate.pdf>
- [19] Business Wire, *FANUC Introduces New Collaborative Robots in Human/Robot Interactive Demonstrations at IMTS 2016*
- [20] Marcin Trojan, FANUC, *Collaborative Robot workshop*
- [21] FANUC, *R-30iB DCS manual*
- [22] Alexandre Campeau-Lecours, *Kinova Modular Robot Arms for Service Robotics Application*, ResearchGate.net
- [23] KINOVA, *KINOVA MICO Robotic arm user guide*, <https://www.kinovarobotics.com/sites/default/files/ULWS-RA-MIC-UG-INT-EN%20201804-1.0%20%28KINOVA%20MICO%E2%84%A2%20Robotic%20arm%20user%20guide%29.pdf>