www.pl2022.pollub.pl
e-mail: pl2022@pollub.pl

Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Lubelskiej

Biuro Projektu:
ul.Nadbystrzycka 38H
20 -618 Lublin

ROBOTY WSPÓŁPRACUJĄCE

Workbook

Jacek Caban
Radosław Cechowicz

Lublin, 2020

PROGRAM WIEDZA EDUKACJA ROZWÓJ

Fundusze Europejskie Wiedza Edukacja Rozwój
Rzeczpospolita Polska
Unia Europejska Europejski Fundusz Społeczny

Spis treści

1 Roboty współpracujące – geneza, ewolucja **3**
1.1 Światowy rynek robotyki przemysłowej 4
1.2 Coboty - roboty współpracujące 4
1.3 Współpraca człowieka i robota 5
1.4 Strony internetowe 7

2 Wybrane konstrukcje robotów współpracujących **8**
2.1 Rethink Robotics 9
2.2 Universal Robots 10
2.3 ABB 11
2.4 KUKA 13
2.5 Fanuc 14
2.6 Siasun 17
2.7 Yaskawa 18
2.8 Mitsubishi 19
2.9 Automata 20
2.10 Hanwha 21
2.11 Przydatne linki 22

3 Zastosowania robotów współpracujących **23**

4 Wymagania bezpieczeństwa stawiane robotom współpracującym **29**
4.1 Normy 36

5 Wybrane zagadnienia konstrukcyjne **37**
5.1 FreeMove 37
5.2 APAS 38
5.3 SRAP 39

6 Przykładowe gniazda produkcyjne z robotami współpracującymi **41**
6.1 Produkcja elementów elektronicznych 41
6.2 Inspekcja i pakowanie wyrobów - piły tarczowe Stihl 41
6.3 Montaż zaworów - Weiss Kunststoffverarbeitung 42
6.4 Dokręcanie śrub w czasie montażu silników spalinowych 43

6.5 Pakowanie ziół w szklarni 44
6.6 Robot do chirurgii czaszki 45

7 Zadania **46**

8 Literatura **47**
8.1 Strony internetowe 47
8.2 Dokumenty cytowane w tekście 47
8.3 Spis rysunków 50
8.4 Spis tabel 51

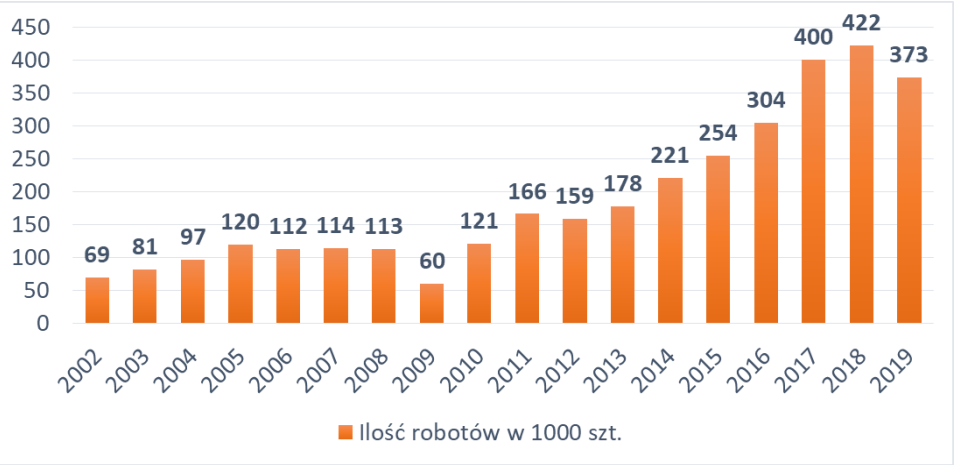
1 Roboty współpracujące – geneza, ewolucja

W procesie użytkowania między środkiem technicznym a człowiekiem tworzą się więzi, dzięki którym powstaje układ antropotechniczny [1]. Człowiek jest powiązany przestrzennie, czasowo i funkcjonalnie z obiektem technicznym i tworzy element tegoż układu. Układ antropotechniczny nie jest tylko prostym złożeniem człowieka i obiektu technicznego, lecz powstaje w wyniku celowego oddziaływania człowieka na środek techniczny [1]. Takim układem może być linia technologiczna na której maszyny i operatorzy maszyn, pracownicy realizują proces produkcyjny. Współcześnie większość procesów technologicznych odbywa się w sposób zautomatyzowany i zrobotyzowany, człowiek odgrywa w nim rolę nadrzędną.

Obecnie pod nazwą robot kryje się każdy automat wykonujący lub uzupełniający jedną lub wiele czynności człowieka, a naukę zajmującą się tą dziedziną nazwano robotyką. Robotyka łączy w sobie wiedzę z wielu dziedzin tj.: mechanika, automatyka, elektronika, informatyka, bionika, ergonomia. Ostatnio adaptuje do swoich celów badania nad sztuczną inteligencją, polegające na analizie sposobu myślenia i edukacji człowieka. Jej celem jest konstruowanie elektronicznych układów mogących naśladować niektóre czynności intelektualne człowieka.

Głównym celem przemysłowego zastosowania robotów było ułatwienie pracy i wycofywanie człowieka z bezpośredniej bliskości szczególnie uciążliwych urządzeń produkcyjnych, do których można zaliczyć:

- działania wysokiej temperatury,
- szkodliwych oparów czy promieniowania,
- hałasu.



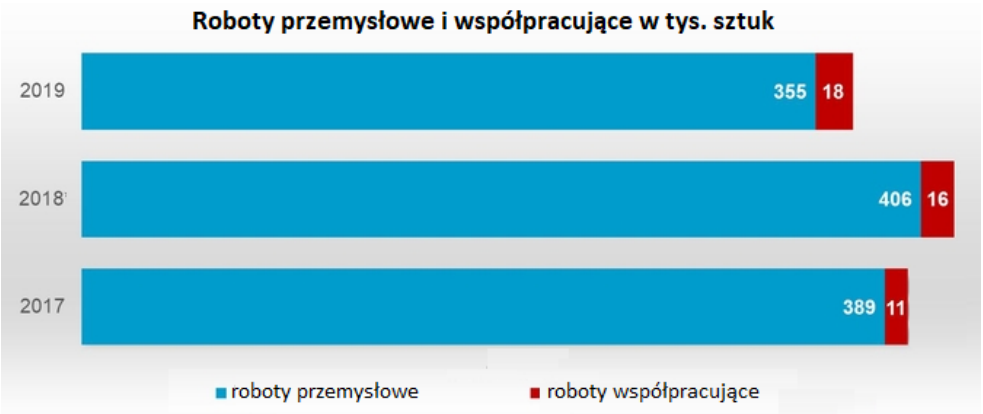
Rys 1. Światowy, roczny zakup robotów przemysłowych (IFR)

1.1 Światowy rynek robotyki przemysłowej

Rynek robotyzacji stale się zmienia a największe zaangażowanie w zakup robotów widoczne jest dla firm związanych z branżą motoryzacyjną, elektryczną i chemiczną. Duże zainteresowanie robotyzacją wykazali producenci z branży spożywczej oraz zajmujący się tworzywami sztucznymi i chemią. Ponadto dzięki coraz większej dostępności robotów, urządzenia te zaczynają coraz bardziej przenikać do sektora małych i średnich firm. Na rysunku 1 przedstawiono tendencję światowego rynku robotów na przestrzeni lat 2002-2019.

1.2 Coboty - roboty współpracujące

Rozwój przemysłowy umożliwia nowe zastosowania systemów robotycznych i ciągły ich rozwój, jak np.: roboty współpracujące. Idea robotów współpracujących zaproponowana została w 1996 r. przez dwóch profesorów z Northwestern University – J. Edwarda Colgate'a i Michaela Peshkina [2]. W wyniku prac zleconych przez General Motors w odpowiedzi na zapotrzebowanie branży motoryzacyjnej na roboty współpracujące z człowiekiem naukowcy opracowali założenia dla tych maszyn. W 2002 r., inżynierowie z General Motors zaproponowali termin Inteligentne Urządzenie Wspomagające (Intelligent Assist Device – IAD) jako alternatywną nazwę dla robota współpracującego. Termin roboty współpracujące, czyli coboty (ang. collaborative robots – cobots) został stworzony przez stowarzyszenie Robotics Industry Association (RIA) w 2003 r. Pierwsze modele przemysłowych robotów współpracujących były dostępne już w 2002 r. Wg normy PN-EN ISO 10218-2 **robotem współpracującym** nazywamy taki, jaki został zaprojektowany do bezpośredniej interakcji z człowiekiem wewnątrz zdefiniowanej przestrzeni współpracy. W przeciwieństwie do robotów przemysłowych pracujących w zamkniętym środowisku, koboty potrzebują dodatkowych mechanizmów, aby zapewnić ludziom bezpieczeństwo podczas współpracy [3].



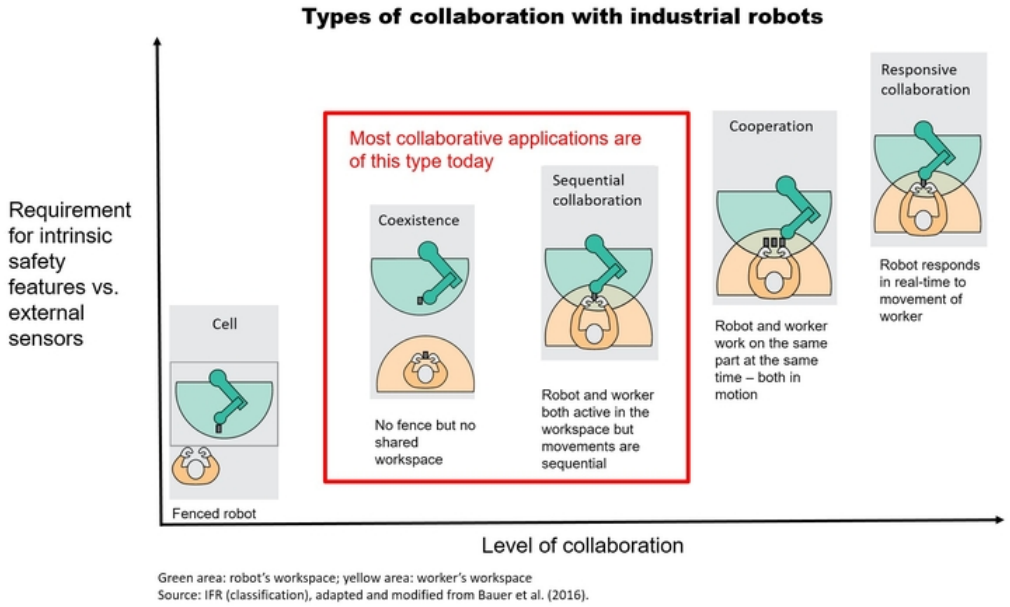
Rys 2. Podział robotów przemysłowych w latach 2017-2019 [4]

Pierwszy europejski cobot pojawił się w 2004 r., był to LBR 2 firmy KUKA. Stanowił on początek dobrze znanej linii cobotów firmy KUKA – począwszy od modelu LBR 4 z 2008 r. do KUKA LBR iiwa z 2013 r. [2] a obecnie najnowszy LBR iisy. Natomiast w 2008 r., pierwszy robot współpracujący UR5 został sprzedany przez duńską firmę Universal Robots. Następnie w 2012 r. pojawił się model UR10, a w 2015 r. stołowy cobot UR3. W roku 2012 firma Rethink Robotics zaprezentowała przemysłowego robota współpracującego Baxter, a w 2015 cobota Sawyer. W 2015 r. zaprezentowano ciężkiego robota współpracującego FANUC CR-35iA o udźwigu do 35 kg.

Roboty współpracujące stanowią obecnie najszybciej rozwijający się segment automatyki przemysłowej. Na rysunku 2., poniżej przedstawiono wykres obrazujący rozwój systemów robotycznych na świecie z podziałem na tradycyjne roboty przemysłowe i współpracujące.

1.3 Współpraca człowieka i robota

Roboty współpracujące zapewniły nowe możliwości automatyzacji procesów przemysłowych, zwiększania ich elastyczności, a przede wszystkim wspólnej pracy z ludźmi. W tradycyjnie zrobotyzowanych aplikacjach, w celu zapewnienia bezpieczeństwa ludzi i procesów, wymagane jest umieszczenie robota w klatce bezpieczeństwa i wykluczenie dostępu operatora do obszaru pracy w czasie, gdy robot jest aktywny. W związku z tym operacje wymagające udziału człowieka nie mogą być w pełni zrobotyzowane.



Rys 3. Różne rodzaje współpracy człowieka z robotem przemysłowym [5]

Wdrożenie robotów współpracujących ma umożliwić połączenie ich powtarzalnej i wydajnej pracy z indywidualnymi umiejętnościami i doświadczeniem człowieka – ludzie są

bowiem zdolni do rozwiązywania niestandardowych zadań, natomiast roboty wykazują się dużą wytrzymałością, precyzją i siłą.

Na rysunku 3., przedstawiono różne poziomy współpracy człowieka z robotem z zaznaczeniem w ramce obszaru pracy cobotów. Natomiast na rysunku 4., przedstawiono przykład współpracy sekwencyjnej i koegzystencji człowieka i robota na linii produkcyjnej w sektorze elektroniki.

Rys 4. Roboty produkcja układów elektronicznych - przykład współpracy sekwencyjnej i koegzystencji człowieka i robota [5]

Obecnie najczęściej używane są aplikacje współdzielonego obszaru roboczego. Robot i pracownik działają obok siebie, wykonując zadania sekwencyjnie. W tym obszarze współpracy integralność systemu sterowania związana z bezpieczeństwem ma istotne znaczenie, szczególnie w przypadku kontrolowania prędkości i siły. Aplikacje, w których człowiek i robot pracują w tym samym czasie na tej samej części, są jeszcze trudniejsze, wymagają bowiem aby robot mógł reagować natychmiast. Zespoły badawczo-rozwojowe chcą aby tak jak przy współpracy dwóch pracowników, roboty dostosowywały swój ruch do otoczenia, umożliwiając prawdziwie odpowiedzialną współpracę. Rozwiązania te obejmują głos, gesty i rozpoznawanie intencji z ruchu człowieka [4].

Generalnie robot może człowiekowi:

- towarzyszyć, w tym wspólnie z nim wykonywać zadania wytwórcze,
- pomagać lub wspomagać.

Dzięki dzisiejszej technologii współpraca człowieka z robotem ma już ogromny potencjał dla każdej wielkości firm i z każdej branży. Roboty współpracujące uzupełnią inwestycje w tradycyjne roboty przemysłowe. Przyszłość zmierza jednak jeszcze dalej, w kierunku, gdzie człowiek będzie jedynie końcowym klientem dóbr w pełni wytwarzanych przez autonomiczne roboty [5].

2 Wybrane konstrukcje robotów współpracujących

Roboty współpracujące zapewniają połączenie ich powtarzalnej i wydajnej pracy (wytrzymałości, precyzji i siły) z indywidualnymi umiejętnościami i doświadczeniem człowieka, który jest zdolny do rozwiązywania niestandardowych zadań. Coboty charakteryzują się lekką konstrukcją mechaniczną i wyróżniają się obłymi kształtami ruchomych elementów oraz wyposaża się je w napędy o małej mocy, co w przypadku kontaktu z człowiek nie stanowi większego zagrożenia.

Do grupy tego typu robotów zaliczają się m.in. roboty takich producentów jak:

- Universal Robots – UR3e, UR5e, UR10e, UR16e,
- ABB – YuMI®,
- Fanuc CR-35ia, CR-4iA, CR-7iA, CR-7iA/L, CRX-10iA, CRX-10iA/L, CR-14iA/L, CR-15iA,
- KUKA,
- Mitsubishi Melfa Assista,
- Rethink Robotics – Baxter i Sawyer,
- HANWHA Robotics.

W tabeli 1, przedstawiono podstawowe dane techniczne opracowane na podstawie literatury wybranych robotów współpracujących.

Cobot	**HCR-5**	**UR5e**	**Melfa Assista**	**YuMi 1 ramię**	**Fanuc CR-4ia**
Waga [kg]	21	18,4	32	9,5	48
Udźwig [kg]	5	5	5	0,5	4
Zasięg [mm]	915	850	910	559	550
Zakresy przegubów	165÷360°	+/- 360°	120÷240°		150°÷720°
Prędkość max	1 m/s	Wszystkie 180°/s Narzędzie: typowe: 1 m/s	124°/s, 360°/s, Narzędzie: typowe: 1m/s	1,5 m/s	1 m/s
Powtarzalność	+/- 0,1 mm	+/- 0,1 mm	+/- 0,3 mm	+/- 0,2 mm	+/- 0,01 mm
Podstawa [mm]	Ø150	Ø149	Ø217	160 x 160	296,5 x 235
Stopnie swobody	6	6	6	7 osi	6

I/O porty We/Wy cyfrowe We/Wy Analog.	4/4 2/2	16/16 2/2	2/4		6/2
Zasilanie I/O	24 V 24 A	24 V 24 A	24 V 24 A	24V	
Komunikacja	GUI, Przyciski: Power, Emergency Switch TCP/IP, EtherCAT,	TCP / IP 100 Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX Gniazdo Ethernet i Modbus TCP	USB, Gniazdo Ethernet,karty pamięci SD, RS-422, Interfejs czujnika siły, Zdalne we / wy	Ethernet, 4 Signals	
Programowanie	RODI 12” ekran dotykowy	graficzny interfejs użytkownika Polyscope, 12” ekran dotykowy z mocowaniem	RT VisualBox RT ToolBox3		
Hałas	Stos. cichy	Stos. cichy		< 55 dB	64,7 dB
Klasyfikacja IP	IP54	IP54	IP54	IP 30 i Clean Room ISO 5	IP67
Pobór mocy	100 W	200 W		9 W chwytaka	500 W
Materiał	Aluminium, stal	Aluminium, PP	Aluminium, PP	Magnez, PP	
Zasilanie	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-240 VAC, 50-60 Hz	100-120 VAC, 200-240 VAC, 50-60 Hz	24 V DC	200-230 VAC, 50-60 Hz

Tabela 1. Dane techniczne wybranych robotów kolaboracyjnych UR, ABB, Fanuc

2.1 Rethink Robotics

Rethink Robotics to firma która powstałą ze start-upu i w 2011 roku zaprezentowała Baxtera, którego następcą jest cobot Sawyer. Baxter służy do prostych prac przemysłowych, takich jak załadunek, rozładunek, sortowanie i przenoszenie materiałów. Baxter to dwuramienny robot z animowaną twarzą. Ma 1,8 m wysokości i waży ok. 137 kg [6][7] . Może wykonywać czynności dla robota dość skomplikowane np. pobieranie elementów z opakowania transportowego, połączenie ich, pokrycie farbą, sprawdzenie jakości połączenia i odesłanie na taśmę. Baxter wykazuje dużą łatwość programowania, przystosowanie do wykonywania nowych czynności zajmuje do 2 minut.

Ciekawe rozwiązanie z szybką wymianą chwytaków posiada cobot Sawyer (Rys. 5). System nazywa się Click Smart i sprawia, że wymiana zestawów chwytaków jest bardzo łatwa i wygodna. Dzięki mocowaniu bagnetowemu chwytaki można wymienić w ciągu kilku sekund bez użycia narzędzi [8]. Ponadto cobot Sawyer przechowuje informacje o produktach i programach, dzięki temu natychmiast rozpoznaje zestawy chwytaków i następuje ładowanie odpowiedniego programu i realizowane są właściwe procesy. Skutkuje to szybkim przezbrojeniem cobota do pracy natychmiast po zmianie systemu chwytania.

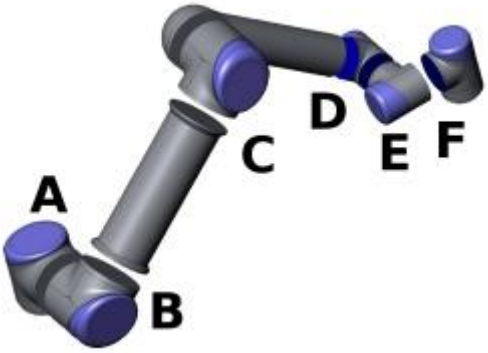
Rys 5. Cobot Sawyer podczas uczenia [9].

2.2 Universal Robots

Rys 6. Roboty współpracujące firmy Universal Robots od lewej UR3e, UR5e, UR10e, UR16e [9,10]

Duńska firma Universal Robots przedstawiła pierwszego swojego cobota UR5 w 2008 r. Roboty Universal Robots są niezwykle bezpieczne mają aż 15 wbudowanych funkcji bezpieczeństwa, które zapewniają dużo wyższy poziom ochrony, niż ten opisany przez normy oraz dyrektywę maszynową [9]. Sam system sterowania robotów UR zawiera osiem funkcji bezpieczeństwa: położenie i prędkość łącznie, położenie Robot tool-center-point, orientacja narzędzia, szybkość i siła, a także pęd i moc robota. Funkcje te można dostosować do wymogów użytkownika.

Przykładowe konstrukcje robotów współpracujących firmy Universal Robots przedstawiono na rysunku 6. Na rysunku 7 przedstawiono elementy strukturalne cobota UR3.

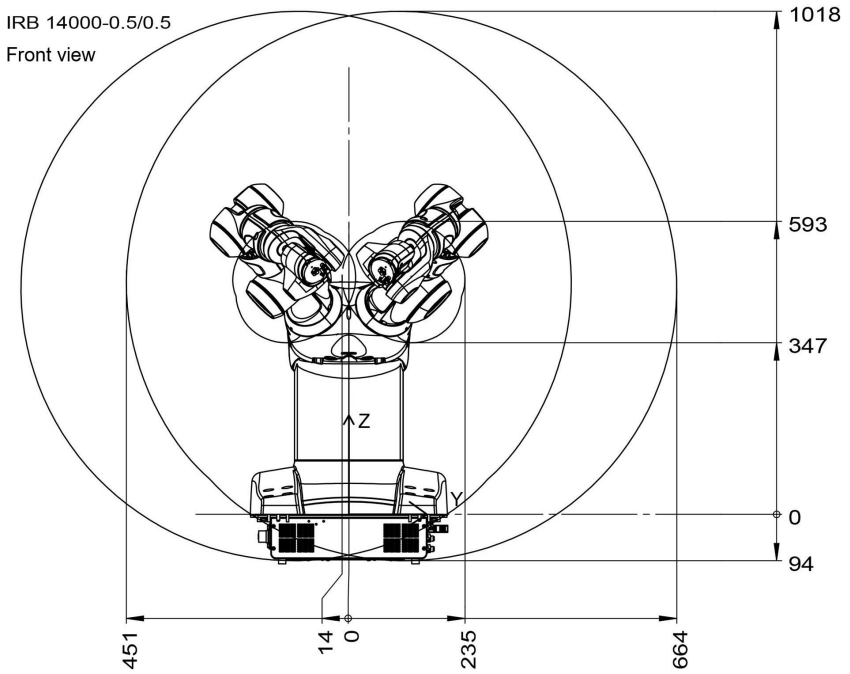


Rys 7. Przeguby robota UR3e: A – podstawa, B – ramię, C – łokieć, D, E, F – nadgarstek 1, 2, 3 [11]

2.3 ABB

Roboty współpracujące mogą być wyposażone w różnorodne efektory, dodatkowe czujniki czy systemy wizyjne, które powiększają wachlarz ich zastosowania. ABB stworzyło i rozwinęło dwuramiennego robota współpracującego z człowiekiem przeznaczonego do montażu małych części YuMi® (Rys. 8.). Zasięg ramion robota jest analogiczny do zasięgu ramion człowieka. Jest to kluczowe przy planowaniu przestrzeni w zakładzie produkcyjnym i pozwala na zainstalowanie YuMi® na stacjach już istniejących, gdzie pracują ludzie.

Robot posiada elastyczne ramiona, system podający części, system do lokalizacji części oparty o kamerę oraz supernowoczesną kontrolę robota [10]. Roboty dwuramienne firmy ABB mają dokładne systemy wizyjne, zręczne chwytaki (Rys. 9) i bardzo czułe czujniki siły. Z kolei elastyczne oprogramowanie oraz wbudowane systemy bezpieczeństwa, pozwalają na programowanie robota nie przez kodowanie a poprzez uczenie.



Rys 8. Zasięg pracy robota IRB 14000 YuMi widok z przodu [12]

Rys 9. Chwytaki robota IRB 14000 YuMi® [13]

2.4 KUKA

Ze względu na zalety strukturalne w wykonywaniu zadań oraz podobieństwo do ludzi, manipulatory o siedmiu stopniach swobody są przedmiotem trendów i mają zastosowanie w szerokim zakresie dziedzin badawczych [11]. KUKA posiada dwa siedmioosiowe roboty współpracujące iiwa 7 R800 oraz LBR iiwa 14 R820. Charakteryzują się one udźwigiem wynoszącym odpowiednio 7 i 14 kg oraz zasięgiem wynoszącym 800 i 820 mm. Mobilnym rozwiązaniem robota współpracującego jest KUKA Mobile Robotics iiwa łączący w sobie lekkiego robota przemysłowego KUKA LBR iiwa (intelligent industrial work assistant) o wysokiej czułości oraz wielokierunkową, mobilną platformę KUKA. Kombinację tych urządzeń przedstawiono na rysunku 10. W ten sposób robot jest bardzo elastycznym, mobilnym asystentem produkcji, co stanowi idealny fundament dla realizacji produkcji Przemysłu 4.0. Jego stworzenie otwiera nowe możliwości w zakresie koncepcji produkcyjnych opartych na bezpośredniej, autonomicznej i elastycznej współpracy człowieka i robota [12].

Rys 10. Robot mobilny KUKA wraz z LBR iiwa [16]

2.5 Fanuc

Fanuc zaproponował dużego robota współpracującego do prac montażowych w branży motoryzacyjnej o symbolu CR-35ia. Poza tym Fanuc dysponuje całą serią mniejszych robotów współpracujących (Rys. 11). Są one oznaczone symbolem CR i stanowią daleko idącą modyfikację standardowych manipulatorów – zostały dodatkowo wyposażone w czujnik siły montowany w podstawie oraz specjalne oprogramowanie modyfikujące pracę systemu robota w celu zapewnienia bezpieczeństwa operatora [5]. Model CR-35ia został dodatkowo wyposażony w specjalną miękką gumowaną obudowę manipulatora. Na rysunku 12, przedstawiono konstrukcję robota kolaboracyjnego Fanuc CR-35iA. W zależności od potrzeb robot współpracujący może być wyposażony w czujnik wizyjny FANUC lub czujnik obszaru FANUC 3D, który umożliwia mu lokalizację lub wizualizację przedmiotów obrabianych [13]. Przykład takiego czujnika przedstawiono na rysunku 13.

Rys 11. Seria robotów współpracujących Fanuc [18]

Dzięki systemom wizyjnym roboty współpracujące „orientują się" w przestrzeni i mają możliwość lokalizacji osób, narzędzi, detali oraz przedmiotów według zadanego wzorca i w określonym obszarze roboczym. Na podstawie informacji płynących z systemu wizyjnego, robot współpracujący samoczynnie podnosi przedmioty lub narzędzia, dostosowując położenie chwytaka lub narzędzia do orientacji i obiektu w przestrzeni roboczej. Robot współpracujący wykorzystuje algorytmy uczenia maszynowego i systemy rozpoznawania obrazu co sprawia, że nauczenie robota lokalizowania i pobierania konkretnych przedmiotów trwa bardzo krótko i jest dość precyzyjne. Drugim istotnym elementem robota współpracującego jest bardzo czuły system pomiaru siły oraz momentu, który pozwala na pracę w trudnych do zautomatyzowania warunkach, w których do niedawna mogli pracować jedynie ludzie [2]. Dzięki tym czujnikom, robot współpracujący zachowuje się nie tylko bezpiecznie w stosunku do otoczenia, ale ma też dokładne informacje na

temat siły, momentów oraz momentów obrotowych na wszystkich swoich ruchomych elementach. Robot współpracujący może wykonywać zadane operacje montażu elementów skomplikowanych ciasno spasowanych (tzw. wcisk) lub precyzyjnie umieszczać podzespoły wyczuwając kliknięcie oznaczające prawidłowe zamocowanie elementu czy wyczuwać również punkt końcowy ruchu, moment dokręcenia. Funkcje te przydatne są również przy pakowaniu. Na podstawie tych informacji może on również odłożyć trzymany przedmiot we właściwym miejscu, czy podać przedmiot człowiekowi [2].

Rys 12. Konstrukcja robota kolaboracyjnego Fanuc CR-35iA [17]

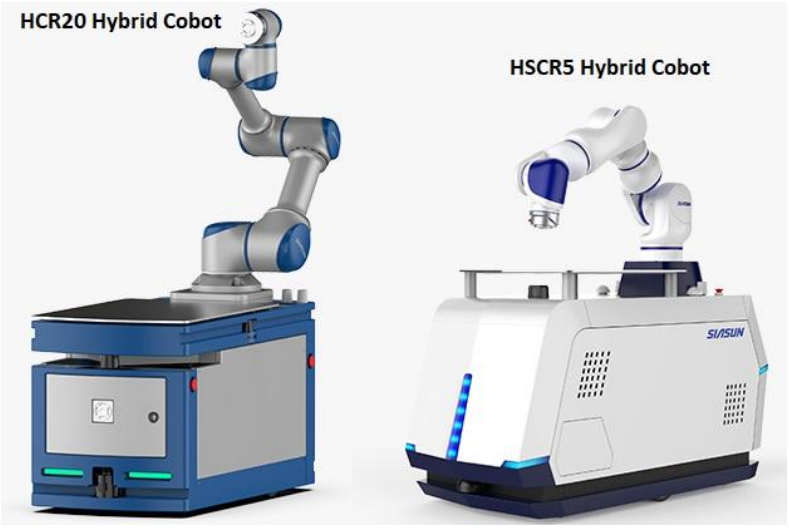
Rys 13. Czujnik wizyjny FANUC [17]

2.6 Siasun

Chińska firma Siasun DUCO z Szanghaju dysponuje całą gamą robotów współpracujących jedno i dwuramiennych o udźwigu od 1 do 20 kg. Są to coboty o następujących symbolach [14]:

- GCR5-910,
- GCR20-1100,
- GCR14-1400,
- SCR5,
- SCR3,
- TCR Table-top,
- DSCR3 cobot dwuramienny,
- DSCR5 cobot dwuramienny.

Ponadto w ofercie jest cobot z robotem mobilnym HCR20 Hybrid Cobot o udźwigu 20 kg i zasięgu 1,1 m oraz dodatkowe 100 kg na platformie mobilnej. Składa się on z AGV i cobota GCR20. Mniejszy zestaw hybrydowy HSCR5 to cobot SCR5 w połączeniu z AGV, technologią rozpoznawania wizualnego, z silnym systemem dyspozytorskim pojazdów AGV, doskonałymi urządzeniami zabezpieczającymi i modułowymi akcesoriami. Oba te roboty cechuje duża powtarzalność na poziomie 0,05 mm. Na rysunku 14, przedstawiono dwa hybrydowe roboty współpracujące firmy Siasun DUCO.



Rys 14. Coboty hybrydowe HCR20 oraz HSCR5 firmy Siasun DUCO [19].

Roboty współpracujące Siasun DUCO przeznaczone są do wielu aplikacji z których najważniejsze to: operacje dokręcania śrub i montażu, polerowanie, nanoszenia powłok, kontrola jakości, operacje podnoszenia, przenoszenia i inne.

2.7 Yaskawa

HC10XP firmy Yaskawa to sześcioosiowy robot współpracujący zaprojektowany do wspomagania operacji spawania ręcznego, do współpracy z ludźmi lub działając w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Udźwig do 10 kg i zasięg ramienia 1,2 m jest wystarczający do prac spawalniczych. Wyposażony jest w system PFL (Power and Force Limiting), korzystający z dwukanałowych czujników momentu obrotowego w każdym z przegubów, którego zadaniem jest monitorowanie momentu obrotowego i szybka reakcja na przekroczenie wartości progowych w razie konieczności. Cechuje go duża powtarzalność. Podobnie jak w innych cobotach mechanizm precyzyjnego prowadzenia ręcznego umożliwia łatwe programowanie i szybką aplikację systemu sterowania. Korpus robota, wykonany z odlewanego aluminium, charakteryzuje się stopniem ochrony IP67 i jest łatwy w czyszczeniu, jego okablowanie (w tym kabel ethernetowy Cat. 6) jest prowadzone wewnątrz ramienia, co eliminuje ryzyko jego zaczepienia i zmniejsza poziom zaburzeń elektromagnetycznych [15].

Rys 15. Robot współpracujący Yaskawa HC10XP i HC20XP firmy Yaskawa [20]

Większym robotem jest HC20XP charakteryzuje się zasięgiem ramienia równym 1,7 m i udźwigiem 20 kg, skonstruowany do zadań związanych z transportem materiałów, obsługą maszyn i montażem. Pracuje w czterech trybach współpracy, w tym tryb PFL, w którym dwukanałowe czujniki momentu obrotowego umieszczone we wszystkich przegubach zapewniają ciągłe monitorowanie siły i bezpieczną reakcję na kontakt. Wszystkie przewody zostały ukryte w wewnętrznych prowadnicach, co eliminuje ryzyko ich przecierania i interferencji z innymi urządzeniami [16]. Podobnie jak HC10XP posiada stopień ochrony IP67, dodatkowo jest odporny na wilgoć i rozbryzgi wody. Podobnie jak opisany wcześniej model posiada wytrzymały mechanicznie korpus z odlewanego aluminium. HC20XP nadaje się do zastosowań w środowiskach wymagających częstego mycia. Ze względu na zastosowany smar NSF H1, może być stosowany w przemyśle spożywczym, gdzie istnieje możliwość przypadkowego kontaktu z żywnością [16]. Oba opisane modele spełniają wymogi norm bezpieczeństwa ISO 13849-1, ISO 10218-1 i ISO TS 15066.

2.8 Mitsubishi

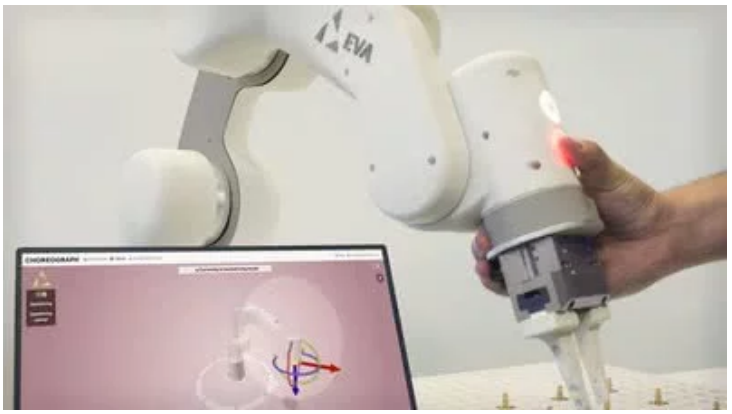
Również Mitsubishi Electric posiada w swojej ofercie małego robota współpracującego o nazwie Melfa Assista zaprojektowany do współpracy z operatorem. Na rysunku 16 przedstawiono widok cobota Melfa Assista oraz chwytaki z napędem elektrycznym i chwytak adsorpcyjny zasilany elektrycznie. Podstawowe cechy tego robota to udźwig 5 kg, zasięg ramienia 0,91 m oraz wysoka powtarzalność, która wynosi ±0,03 mm. Zakres zastosowań obejmuje zarówno standardowe aplikacje przemysłowe, jak i te o szczególnych wymogach - na przykład może być dostarczana wersja z certyfikowanym smarem NSF H1, dopuszczonym do zastosowań w przemyśle spożywczym [17]. Robot może być wyposażony w kamerę mocowaną do ręki robota. Kamera o wysokiej wydajności identyfikuje cel i ustala pozycję z dużą prędkością.

Rys 16. Robot współpracujący Melfa Assista firmy Mitsubishi Electric z efektorami [23].

Robot wykorzystuje technikę bezpośredniego uczenia, polegającej na uchwyceniu ramienia i przesunięciu go do zadanej pozycji. Pozycja jest zapisywana przez naciśnięcie przycisku na klawiaturze wbudowanej w ramię cobota. Stanowi uzupełnienie środowiska RT Visualbox do programowania wizualnego, oferującego funkcje drag and drop oraz możliwość indywidualnego dostrajania każdego ruchu. Melfa Assista ma możliwość przełączania go między trybem współpracy z człowiekiem (mniejsze prędkości) oraz trybem większej prędkości, wymaganym dla linii produkcyjnych. Robot ma możliwość diagnostyki błędów i monitorowania stanu pracy za pomocą systemu wizyjnego 6-kolorowy LED, zamontowanego na przedramieniu robota. Melfa Assista spełnia wszystkie wymagania bezpieczeństwa określone w normach ISO 10218-1 oraz ISO/TS 15066.

2.9 Automata

Londyński start-up robotyczny Automata wprowadza na rynek ramię robotyczne pod nazwą Eva. Główne przeznaczenie robota to zastosowania w laboratoriach, nauczaniu oraz obsługa linii produkcyjnych. Firma pracowałą nad rozwojem Eva dwa lata, w tym czasie stworzono ponad 18 wersji robota oraz przeprowadzono liczne testy. Testy przeprowadzano m.in. u klientów z branży motoryzacyjnej, maszynowej oraz jednostek laboratoryjnych. Zastosowania Eva obejmują m.in. obsługę maszyn (załadunek, pobieranie produktów), badanie produktów, malowanie natryskowe oraz aplikacje pick&place [18]. Na rysunku 17., przedstawiono robota Eva przy pracy laboratoryjnej.



Rys 17. Robot współpracujący Eva [17]

Główne parametry techniczne robota Eva:

- udźwig robota wynosi 1,25 kg,
- powtarzalność to ±0,5 mm,
- Ciężar to 8 kg, włączając w to zintegrowany sterownik,
- urządzenie bazuje na autorskim systemie przekładni bezluzowych,
- Oprogramowanie Choreograph pozwala m.in. na zdalną diagnostykę oraz prewencyjne utrzymanie ruchu.

2.10 Hanwha

Hanwha to firma z Korei, która w swojej ofercie posiada roboty kolaboracyjne o udźwigu 3, 5 i 12 kg. Na stronie internetowej polskiej firmy Corobotics oferującej te roboty można znaleźć wiele materiałów na temat robotów kolaboracyjnych oraz zasad ich stosowania. Wśród zastosowań robotów producent wymienia: spawanie, montaż, paletyzację, obsługę maszyn cnc, itp.

Rys 18. Robot współpracujący HCR-5 [19]

Więcej informacji:
Corobotics: https://corobotics.pl/produkty/
Hanwha: https://www.hanwharobotics.com/En/Product/Product

2.11 Przydatne linki

Artykuły w czasopismach internetowych

https://automatykaonline.pl/Artykuly/Robotyka/Gotowi-na-wyzwania-Przemyslu-4.0.-Roboty-firmy-KUKA
https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/14621-mitsubishielectric-bezpieczny-i-precyzyjny-robot-wspolpracujacy-o-latwej-obsludze
https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/10802-eva-nowy-robot-wspolpracujacy
https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/14913--szescioosiowy-robot-wspolpracujacy-do-wspomagania-operacji-spawania-recznego
https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/14396-yaskawa-nowy-robot-wspolpracujacy-o-udzwigu-20-kg-i-zasiegu-1700-mm
https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/11009-yaskawa-szescioosiowy-robot-wspolpracujacy-o-udzwigu-10-kg-i-zasiegu-1-2-m
https://tech.wp.pl/baxter-robot-ktory-wspolpracuje-z-czlowiekiem-6034867499492481a

Fanuc

https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots/collaborative-cr35ia
https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots

Mitsubishi

https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/catalog/robot/l(na)-09104eng/l09104a.pdf

Corobotics

https://corobotics.pl/akademia-hcr-online/

ABB Yumi

https://new.abb.com/products/robotics/pl/roboty-przemyslowe/yumi

Rethink Robotics

https://www.rethinkrobotics.com/fileadmin/user_upload/sawyer/rr-blackedition-brochure_low.pdf

Universal Robots

https://www.universal-robots.com/pl/produkty/robot-ur16e/

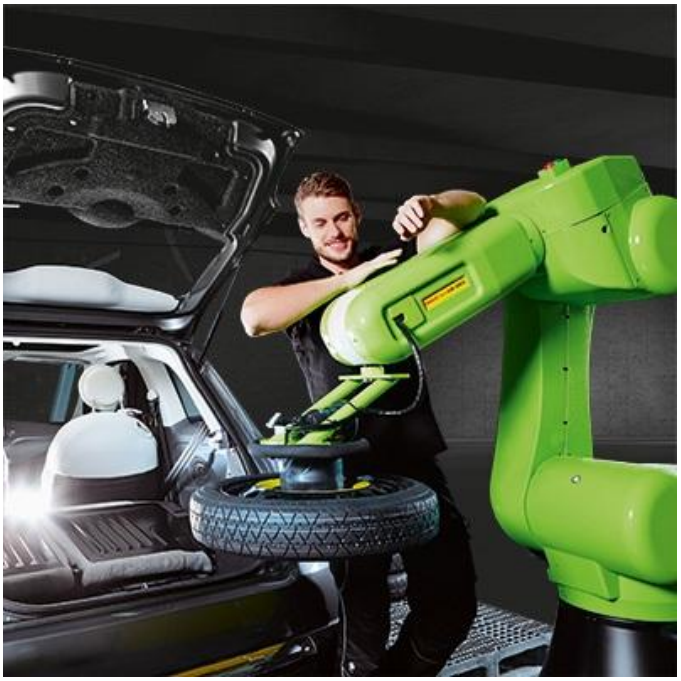
Siasun

https://www.siasun-in.com/en/goods/pro_detail/cid/5.html
https://www.siasun-in.com/en/goods/product_dujqr.htm

Miejsce na notatki

3 Zastosowania robotów współpracujących

Roboty współpracujące mogą być wykorzystywane zarówno do użytku przemysłowego, jak i w codziennej pracy, np. w szpitalu (robot pracujący w szpitalu może dostarczać leki konkretnym pacjentom za pomocą automatycznego systemu sterującego). Cobot może być umieszczony w jednej stałej pozycji lub poruszać się samodzielnie i wykonywać ograniczone ruchy. Jest przeznaczony do współpracy w środowisku, w którym znajduje się człowiek i może nastąpić przypadkowy kontakt z nim. W aplikacjach medycznych mamy do czynienia zarówno z cobotami, jak i robotami medycznymi (służącymi np. do rehabilitacji).



Rys 19. Robot współpracujący Fanuc CR-35ia przy montażu koła zapasowego [17]

W aplikacjach przemysłowych kontakt z robotem może być przypadkowy lub celowy. W kontakcie celowym operator pracuje w tej samej przestrzeni roboczej oraz steruje robotem za pomocą dotyku.

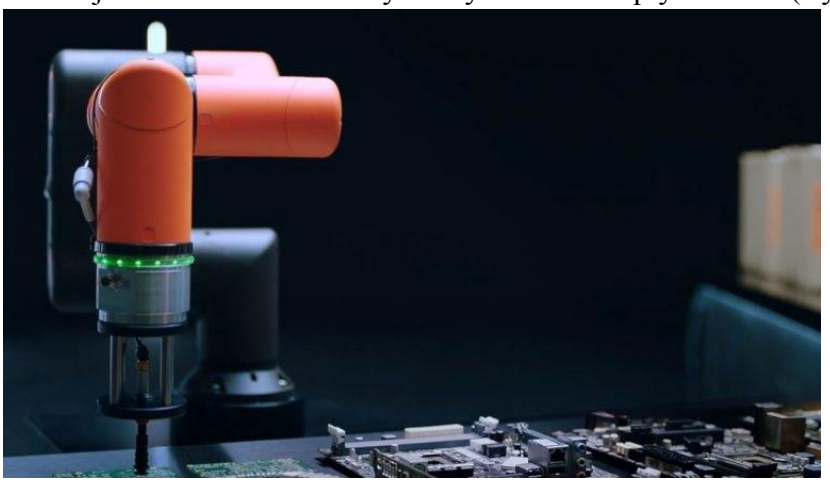
Roboty takie wydają się być idealnym rozwiązaniem przy:

- wsparciu prac montażowych,
- transporcie,
- pakowaniu i paletyzacji relatywnie lekkich elementów,
- kontroli jakości,
- operacjach laboratoryjnych,

- jako zastępca operatora przy załadunku i rozładunku narzędzi różnych maszyn produkcyjnych, wykonujących główną część obróbki automatycznie,
- operacje obróbki wykańczającej (polerowanie),
- nakładanie powłok ochronnych,
- operacje z obwodami drukowanymi (PCB) i testowanie obwodów (ICT),
- malowanie i klejenie,
- badaniach w biomedycynie i przemyśle farmaceutycznym.

W każdej branży występują procesy montażu lub pakowania. Inteligentne roboty współpracujące doskonale sprawdzą się do szerokich zastosowań związanych z tymi operacjami. Roboty współpracujące zajmują się pakowaniem surowców, wyrobów gotowych, czy obsługę wielopaków, paletyzację czy kontenery. W tych ostatnich sprawdzą się roboty o większym udźwigu (kilkanaście kg) i dłuższym zasięgu pracy ramienia robota jak Fanuc CR35ia (Rys. 19).

Coboty i lekkie roboty przemysłowe wyposażone w odpowiednie narzędzia mogą być w jednej firmie wykorzystywane do wielu aplikacji, a rozwój narzędzi EoAT (ang. end of arm tooling) sprawia, że obecnie roboty mogą automatyzować procesy, np. z wykorzystaniem bardzo delikatnych elementów, takich jak rośliny czy komponenty elektroniczne [Klecha]. Łatwości programowania oraz szybkość wdrożenia na konkretnym stanowisku to główne atuty cobotów. Dzięki tym cechom roboty współpracujące mogą zrobotyzować niemal każdą branżę i proces produkcyjny. Nawet w uznanych za trudno aplikacyjnych dla robotów środowiskach pracy możliwe są wdrożenia. Taką była branża ICT ze względu na delikatną naturę części i częstotliwość modyfikacji linii produkcyjnych. Utrzymanie wysokiej powtarzalności do 0,1 mm i zdolności do szybkiej adaptacji do istniejącej infrastruktury bez konieczności znaczących zmian na linii produkcyjnej, możliwe jest zrobotyzowanie procesu montażu, umieszczania elementów elektronicznych, produkcji obwodów drukowanych czy testowania płytek PCB (Rys. 20).



Rys 20. Robot współpracujący HCR3 firmy HANWHA Robotics w aplikacji PCB [25].

Funkcjonalność aplikacji PCB sprowadza się do [20]:

- sterowanie testerami ICT,
- odczyt kodów kreskowych, nadrukowanych znaków i symboli,
- montaż płytek w obudowach zatrzaskowych, przykręcanie, oklejanie, znakowanie,
- delikatne umieszczanie płytek w gniazdach z użyciem czujnika siły,
- precyzyjne lakierowanie płytek środkami zabezpieczającymi,
- dowolna czynność przy maszynie w oparciu narzędzia zainstalowane na końcu ramienia robota.

Najmniejszy z robotów Universal Robots UR3e jest popularny wśród placówek naukowych, jak również w przemyśle farmaceutycznym i elektronicznym. Główne zadania tego cobota to montaż niewielkich przedmiotów, operacje klejenia czy przykręcania śrub odpowiednim momentem, obsługa małych narzędzi, lutowanie i malowanie. Większe modele cobotów UR mogą wykonywać podobne operacje z tym, że o większych gabarytach. Roboty współpracujące dobrze współpracują z maszynami CNC, gdzie z dużą dokładnością i powtarzalnością robot pobiera części, umieszcza w gnieździe obróbczym maszyny, a następnie je odkłada (Rys. 21). Roboty współpracujące komunikują się z maszynami CNC, sprawdzając ich gotowość do działania, i umieszczają w urządzeniach elementy, następnie zamykają drzwi, wychodzą z przestrzeni roboczej CNC i czekają na sygnał oznajmiający koniec obróbki [https://przemyslprzyszlosci.gov.pl/pod]. Gotowy element obrabiany robot UR10e oczyszcza z resztek metalu sprężonym powietrzem, wyjmuje z maszyny i odkłada na paletę.

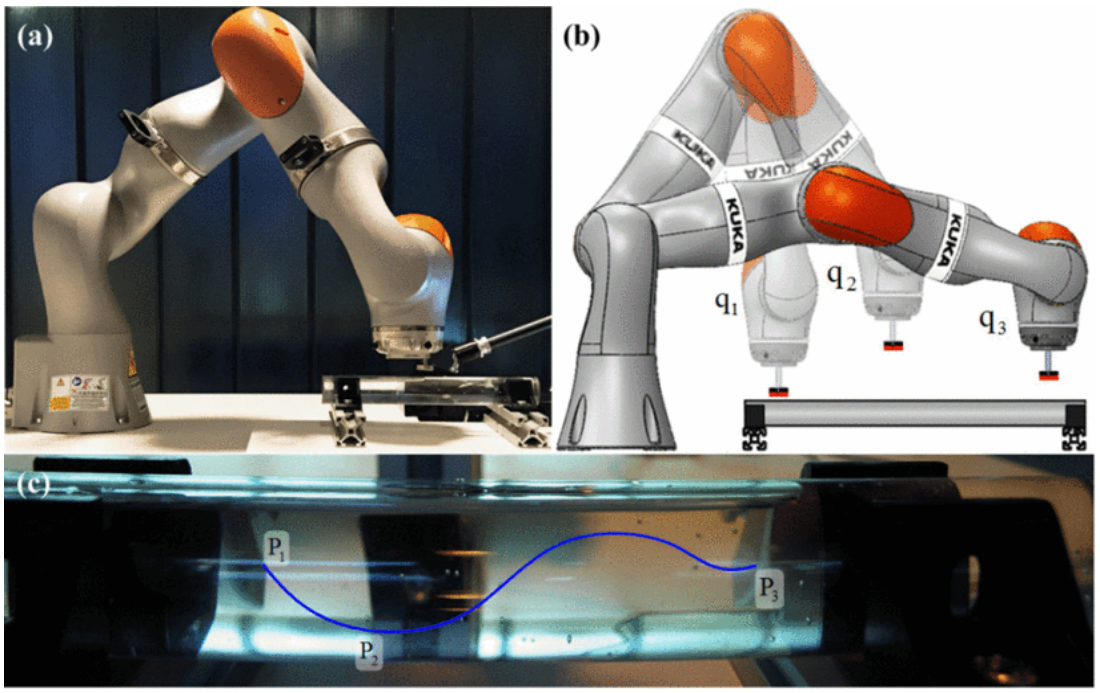
Rys 21. Robot UR10 pracujący przy obsłudze obrabiarki CNC [26]

Możliwa jest również obsługa innych maszyn jak wtryskarki, wytłaczarki, maszyny odlewnicze. Robot współpracujący wykonuje operacje obsługi maszyny, odcinaniem wlewów, pakowaniem, kontrolą jakości wyprasek itp. Inne zastosowanie to obsługa pras do plastycznej obróbki metalu m.in.: prasy krawędziowe, wykrawarki, gilotyny, prasy hydrauliczne i mimośrodowe itp. Cobota daje się dostosować do częstej zmiany obrabianych detali, są precyzyjne przy ładowaniu i rozładowywaniu części, czy obsługując złożone maszyny dzięki łatwości programowania.

Jednym z przykładów aplikacji w branży elektrycznej jest robot YuMi® na stanowisku montażu w Elektro-Pradze. Na linii produkcyjnej znajdują się robot YuMi®, czujniki, przenośniki, podajniki wibracyjne oraz sprężyny. Stanowisko obsługiwane jest również przez operatora. Cobot obsługuje sprężyny, zabezpieczenia gniazdek chroniące dzieci oraz osłony zabezpieczające. Proces montażu jest uruchamiany przez operatora, który układa przed robotem dwie pokrywy gniazdka elektrycznego i dwie osłony zabezpieczające [21]. Za pomocą chwytaka podciśnieniowego robot chwyta zabezpieczenie chroniące dzieci aby umieścić je na przygotowane pokrywy gniazd. W kolejnym kroku robot pobiera sprężyny z podajnika (dwa element na każde gniazdko) i umieszcza je między zabezpieczeniem i pokrywą. Robot YuMi® chwyta zabezpieczenie i umieszcza je na gniazdku elektrycznym, które jest wyposażone w zabezpieczenie i sprężynę. Montaż gniazdek elektrycznych kończy się dociśnięciem pokrywy zabezpieczenia w gniazdko [21]. Operator wkłada śrubę w pokrywę i przekazuje kompletne gniazdo do pakowania. Dodatkowo do momentu przeniesienia części, operator jest odpowiedzialny za nadzór całego procesu montażu. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 22.

Rys 22. Widok stanowiska montażu z robotem współpracującym YuMi® [27].

Możliwe jest również zastosowanie robotów współpracujących w badaniach medycznych. W pracy Kalila i współautorów [22], zaprezentowano wykorzystanie cobota KUKA LBR iiwa 7 R800 do sterowania ruchem mikrocząstek paramagnetycznych w płynie o niskiej liczbie Reynoldsa przy użyciu systemu robotycznego opartego na magnesach trwałych o otwartej konfiguracji. Kontrola magnetyczna nośników leków przy użyciu systemów o otwartej konfiguracji ma zasadnicze znaczenie dla umożliwienia skalowania do rozmiaru zastosowań *in vivo*. Ogólnie uważa się, że systemy elektromagnetyczne o zamkniętych konfiguracjach [23] mają zasadnicze znaczenie dla różnorodnych zastosowań biomedycznych podczas eksperymentów *in vitro* [24–26]. Przedstawiony na rysunku 23 system składa się z ramienia robota i cylindrycznego magnesu NdFeB przymocowanego do jego efektora końcowego (a). Mikrocząstki paramagnetyczne o średniej średnicy 100 µm znajdują się wewnątrz szklanej rurki i umieszczane w przestrzeni trójwymiarowej (3D) przy użyciu gradientów pola. Konfiguracja ramienia robota (wskazana za pomocą współrzędnych przestrzeni stawu q) kontroluje wyłącznie położenie mikrocząstek w przestrzeni 3D (b). Mikrocząstka porusza się po ścieżce (niebieska trajektoria) w sposób kontrolowany na podstawie konfiguracji ramienia robota. p1, p2 i p3 to wektory położenia mikrocząstek odpowiadające odpowiednio konfiguracjom robotów q1, q2 i q3 (c) [22].



Rys 23. System robotyczny LBR iiwa 7, a) ramię robota i cylindryczny magnes NdFeB, b) konfiguracja ramienia robota, c) niebieska trajektoria ruchu mikrocząstki [28].

Roboty współpracujące są dostępne dla międzynarodowych korporacji z dużym kapitałem ale są również atrakcyjne cenowo dla sektora MŚP, oferując szybki zwrot nakładów poniesionych na inwestycję w ich instalację. Człowiek pracujący w bezpośrednim sąsiedztwie robota wspomaga pracę maszyny [27], ułatwiając robotowi realizację trudniejszych lub nietypowych zadań. Często zdarza się, że to człowiek podaje robotowi elementy do obróbki (np. Elektro-Praga), dzięki czemu unika się konieczności stosowania i budowy systemu różnego rodzaju skomplikowanych automatycznych podajników i stosowania kamer i systemów rozpoznawania obrazu.

Dzięki łatwym w użyciu, graficzno-ruchowym aplikacjom do programowania cobotów, możliwe jest szybkie zrobotyzowanie poszczególnych elementów linii technologicznej, nawet w wypadku produkcji średnio- i krótkoseryjnej. Przykład urządzenia do nauki cobota Fanuc CR35ia przedstawiono na rysunku 24. Uniwersalność robotów współpracujących przejawia się w tym, że może przez kilka godzin pracować przy obsłudze centrum obróbczego CNC, aby za chwilę fizycznie przenieść go do magazynu i przysposobić do sortowania wysyłanych do klienta wyrobów. Przykład ten pokazuje jak szybko roboty współpracujące mogą być adaptowane do nowych aplikacji.

Rys 24. Urządzenie ręczne do nauki cobota Fanuc CR35ia [17].

Jak wynika z przedstawionego studium aplikacyjność robotów współpracujących jest bardzo duża, i w zasadzie coraz mniej ograniczona, co w przyszłości może zaowocować zastosowaniem robotów w nowych sektorach przemysłowych i gospodarczych.

4 Wymagania bezpieczeństwa stawiane robotom współpracującym

Oddziaływania obiektu technicznego na człowieka mogą trwale wpływać na jego zdrowie lub nawet zagrażać jego życiu. Z tego względu istnieje potrzeba stosowania kryteriów bezpieczeństwa pracy w ocenie układów antropotechnicznych [1]. Praca z robotami współpracującymi może być potencjalnym źródłem stresu dla ich operatorów [28]. W odniesieniu do stanowisk zrobotyzowanych bezpieczeństwo stanowi bardzo szeroki zakres wiedzy oraz kompetencji i odgrywa ważną rolę na etapach projektowania, wytwarzania i eksploatacji zarówno maszyn, jak i całych stanowisk produkcyjnych [5,29]. Wspólna praca robotów z ludźmi wymaga zatem zapewniania wysokiego poziomu bezpieczeństwa i ograniczania ryzyka.

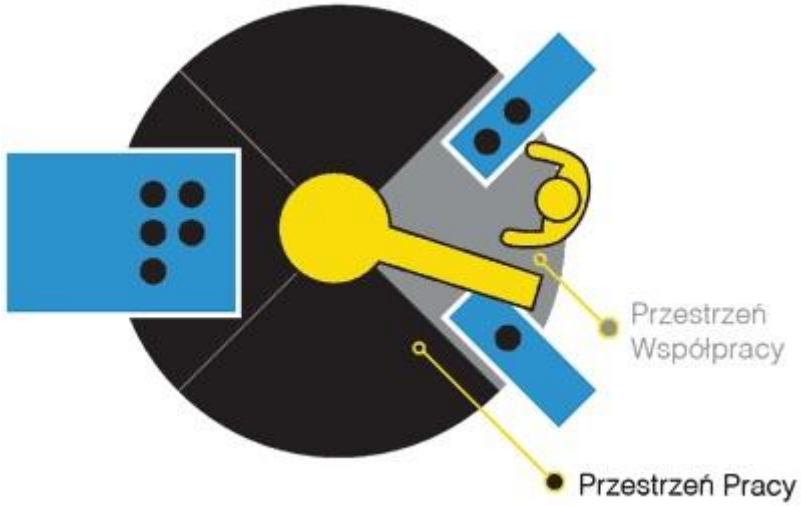
Bezpieczne roboty zostały zbudowane w taki sposób, aby możliwe było znaczące ograniczanie mocy i siły jego ruchów. Nie bez znaczenia są tutaj również kształt i materiały wykorzystane do wytworzenia manipulatora. Eliminację zagrożenia dla ludzi pracujących w bezpośrednim otoczeniu robotów współpracujących uzyskano za sprawą wykorzystania szeregu sensorów, m.in.: czujników siły zamontowanych w przegubach, które wykrywają zmiany sił działających na robota, kamer i czujników monitorujących strefę pracy oraz najbliższy obszar pracy. Jednak integracja ludzi i robotów w tym samym obszarze roboczym może stanowić wyzwanie dla społecznych czynników ludzkich [30]. Istotne są też modyfikacje parametrów pracy robota, a także wprowadzone zmiany konstrukcyjne do mechanicznych elementów maszyny [2]. Dzięki temu robot automatycznie wykrywa kolizje z innymi obiektami i natychmiast na nie reaguje. Roboty współpracujące monitorują siłę potrzebną do ruchu i gdy ta zaczyna odbiegać od zadanych parametrów (np. kiedy uderzy osobę lub jakikolwiek przedmiot znajdujący się w jego otoczeniu), wstrzymują pracę lub cofają się do pozycji bezpiecznej. Dodatkowe zabezpieczenie w postaci pokrycia robota miękkim materiałem oraz pozbawienie wszystkich jego elementów ostrych krawędzi i kantów podnosi poziom bezpieczeństwa w kontakcie z człowiekiem. Roboty współpracujące mają wewnątrz swojej obudowy schowane wszystkie przewody zasilające co eliminuje niebezpieczeństwo zaplątania się w luźno zwisające przewody co znane jest z tradycyjnych robotów przemysłowych. Często spotykanym rozwiązaniem są amortyzowane osłony, które dodatkowo absorbują wstrząsy. Należy pamiętać, że pozostaje zawsze zagrożenie wynikające z działania końcówki roboczej, ale dotyczy to również urządzeń obsługiwanych przez pracowników [2]. Poprzez tak dobraną konstrukcję, wewnętrznie bezpieczną, osiągalne jest zapewnienie nieurazowych warunków współpracy z człowiekiem w określonych aplikacjach.

Podstawowym dokumentem wymuszającym zapewnianie bezpieczeństwa robotów, podobnie zresztą jak innych maszyn stosowanych w przemyśle, jest dyrektywa maszynowa 2006/42/EC [9]. W lutym 2016 roku normy ISO dla tradycyjnych robotów przemysłowych zostały

wzbogacone o specyfikację techniczną odnoszącą się do wersji współpracujących ISO/TS 15066 wspierającą dokumenty PN-EN ISO 10218-1 i PN-EN ISO 10218-2, oraz PN-EN ISO 13849-1.

ISO/TS 15066 to pierwsza na świecie specyfikacja techniczna, która skupia się na aspektach bezpieczeństwa związanego z kooperacją ludzi z robotami współpracującymi. W dokumencie tym precyzyjnie zdefiniowano wszystkie elementy wpływające na bezpieczeństwo człowieka współpracującego z robotem oraz warunki, które muszą być spełnione, aby uznać taką pracę za bezpieczną. Specyfikacja ISO/TS 15066 zawiera wytyczne dotyczące oceny ryzyka podczas procesu instalacji i pracy robota współpracującego w określonym zastosowaniu. W szczególności podkreślono, aby nie tylko robot, ale cały system, który obejmuje narzędzia i elementy, z którymi robot ma kontakt, spełniał stosowne normy bezpieczeństwa (m.in.: wspomniane już wcześniej). Dokument ten zawiera też cenne wskazówki związane z szacowaniem ryzyka, które przeznaczone są dla integratorów zajmujących się implementacją robotów współpracujących. Oszacowanie ryzyka jest całościowym procesem obejmującym analizę i ocenę ryzyka. Oznacza to identyfikację wszystkich rodzajów ryzyka i zmniejszenie ich do akceptowalnego poziomu (mówi o tym norma PN-EN ISO 12100).

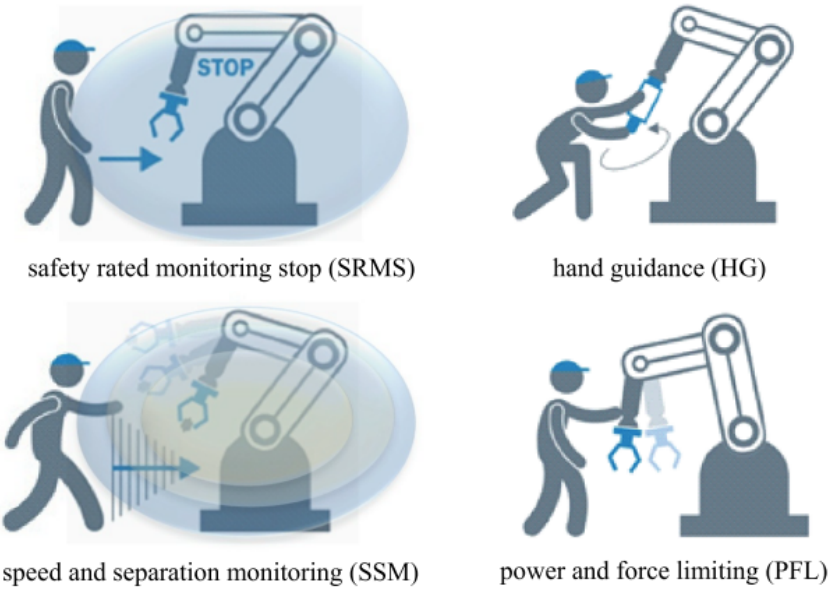
Przestrzenią współpracy (Rys. 25.), nazywamy część przestrzeni pracy, w której system zrobotyzowany (w tym także przedmiot obrabiany) i człowiek realizują zgodnie zadania produkcyjne. Przestrzeń współpracy może pokrywać się tylko częściowo z przestrzenią pracy robota. Przestrzeń współpracy jest podstawowym kryterium, jakie należy wziąć pod uwagę, projektując aplikację z robotem współpracującym. Może się bowiem okazać, że ze względu na zagrożenia i związany z nimi poziom ryzyka konieczne będzie stosowanie odrębnych środków zabezpieczających w przestrzeni współpracy oraz dla pozostałej przestrzeni pracy robota [31].



Rys 25. Podział obszaru działania na stanowisku pracy z robotem [4].

Specyfikacja techniczna ISO/TS 15066 wyróżnia cztery typy aplikacji współpracujących (Rys. 26):

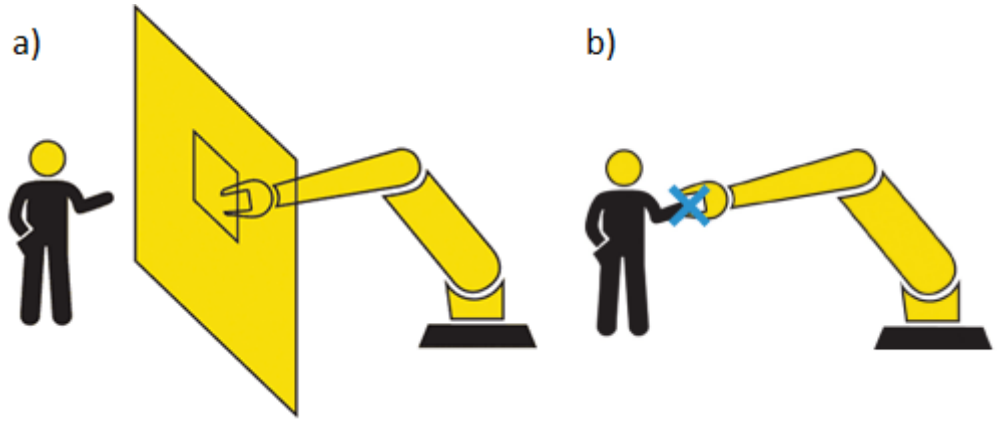
1. Bezpieczeństwo oceniane – monitorowane zatrzymanie (ang. safety-rated monitored stop) – zatrzymanie jest zapewnione bez konieczności wyłączania mocy. W tym przypadku człowiek i system robotyczny nie mogą poruszać się w jednym czasie.
2. Prowadzenie ręczne (ang. hand-guiding) – zasadniczo ręcznie sterowany system robotyczny. System robotyczny i człowiek mogą poruszać się jednocześnie. Cobot jest kontrolowany przez operatora.
3. Monitorowanie prędkości i oddzielania (ang. speed and separation monitoring) – prędkość systemu robotycznego będzie sterowana w oparciu o odległość między nim a intruzem. Obecnie wykorzystywane są do tego urządzenia zewnętrzne, m.in skanery czy czujniki wizyjne, które w przyszłości będą zintegrowane z systemem robotycznym. W tym przypadku człowiek i robot współpracujący mogą poruszać się jednocześnie. System robotyczny zwolni w miarę zbliżania się do obiektu. Możliwe jest zatrzymanie przed obiektem lub uderzenie z siłą określoną w specyfikacji.
4. Ograniczenie mocy i siły (ang. power and force limiting) – prędkość, moment obrotowy i ruch sterowane są w taki sposób, że ból nie będzie odczuwalny lub człowiek nie zostanie zraniony. W tym przypadku system robotyczny i człowiek pracują jednocześnie, a siła, prędkość i ruch są w pełni kontrolowane – aplikacja nie spowoduje bólu czy uszkodzenia ciała, nie ma też potrzeby stosowania dodatkowych tradycyjnych zabezpieczeń, klatek, systemów czujników. Parametry są określane na podstawie analizy ryzyka.



Rys 26. Cztery typy aplikacji współpracujących [38,39].

Pierwsze trzy metody współpracy odnoszą się również do aplikacji z tradycyjnymi robotami przemysłowymi. Roboty te jednak muszą być odpowiednio skonstruowane lub zostać doposażone w dodatkową zewnętrzną aparaturę (systemy monitorowania obszaru roboczego). Czwarta aplikacja to tryb współpracy zakładający typowe wykorzystanie robotów współpracujących.

Metoda nr 1 zobrazowana jest na rysunku 27a), i jest ona powszechnie stosowana w różnego rodzaju stacjach montażowych, celach spawalniczych lub zgrzewalniczych itp. Przestrzeń wokół robota jest wyznaczona i nadzorowana za pomocą tzw. obwodzących środków ochronnych. Należą do nich różnego rodzaju osłony (np. popularne rolety szybkobieżne) czy aparatura optoelektroniczna. Operator ma za zadanie jedynie odbiór poprzedniego i załadunek kolejnego przedmiotu obrabianego do chwytaka robota. W trakcie tych czynności operator znajduje się w przestrzeni roboczej robota. Obecność pracownika rozpoznawana jest przez zamontowane środki detekcji. Ich reakcja wymusza wyzwolenie w sterowaniu robota tzw. bezpiecznego kontrolowanego zatrzymania [31]. Jest ono zazwyczaj realizowane w kategorii 2 zatrzymywania (wg PN-EN 60204-1) - czyli z kontrolą bezruchu i pozostawieniem zasilania na napędach osi robota (np. w celu zachowania określonych parametrów technologicznych, momentu trzymającego czy pozycji robota). Bezruch urządzenia kontrolowany jest przez dodatkowe elementy w układzie sterowania (np. enkodery, czujniki położenia i ruchu). W przypadku nieoczekiwanego ruchu robota dochodzi do jego detekcji i bezzwłocznego odłączenia zasilania napędów, czyli tzw. kategorii 0 zatrzymywania wg PN-EN 60204-1 [31].

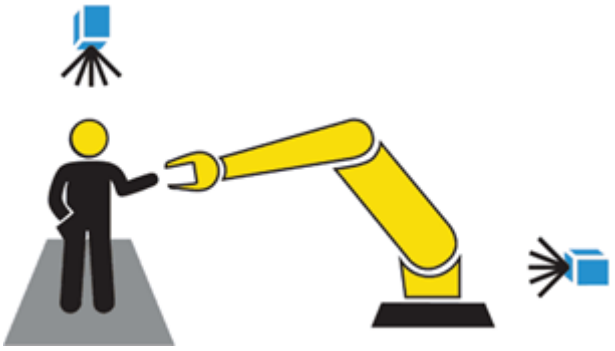


Rys 27. Typy współpracy człowieka z robotem [4] .

Operator opuszcza przestrzeń nadzorowaną natychmiast po załadunku i wyzwala cykl produkcyjny. W tym momencie funkcjonuje system odgradzający pomiędzy operatorem a robotem. W przypadku gdy dochodzi do naruszenia tej strefy ruch robota i operacje technologiczne ulegają bezpiecznemu zatrzymaniu. Podobnie system zachowuje się w przypadku wykrycia nieoczekiwanego ruchu robota

podczas przestoju. Po zakończeniu cyklu produkcyjnego i ustawieniu robota w pozycji do przekazania materiału do odbioru możliwy jest dostęp operatora do przestrzeni współpracy w celu ponownego załadunku przedmiotów obrabianych, w trakcie którego ponownie monitorowany jest bezruch robota w kategorii 2 zatrzymywania wg PN-EN 60204-1 [31].

Metoda nr 2 zakłada wykorzystanie robota jako urządzenia wspomagającego, automatyzującego procesy montażowe czy poprawiającego ergonomię pracy, zobrazowana jest na rysunku 26b). Klasycznym przykładem jest tutaj wsparcie operatora przy instalacji foteli w autach na liniach produkcyjnych. W tym trybie pracy ruch robota generowany jest na żądanie montażysty. Sterowanie robotem jest realizowane za pomocą urządzenia sterowania ręcznego obydwu rąk z funkcją podtrzymywania. W zależności od pozostałych zagrożeń i w konsekwencji od wyboru urządzenia zezwalającego, praca z robotem będzie możliwa tylko przy aktywacji przycisków dwustanowych lub tylko przy aktywacji przycisków trójstanowych – w pozycji środkowej aktywowanej z odpowiednią siłą [31]. Prędkość robota jest ograniczona do wartości bezpiecznej, określonej w analizie ryzyka. W przypadku przekroczenia wartości granicznej ruchy robota ulegają zatrzymaniu. Konieczne jest więc stosowanie tutaj funkcji bezpieczeństwa dla napędów opisanych szerzej w normie PN-EN 61800-5-2 (Elektryczne układy napędowe mocy o regulowanej prędkości – Część 5-2: Wymagania dotyczące bezpieczeństwa – Funkcjonalne).



Rys 28. Zobrazowanie 3 typu współpracy człowieka z robotem [4].

Trzecia metoda aplikacji zakłada doposażenie robota lub aplikacji w aparaturę monitorującą mającą za zadanie wykryć człowieka w pełnej przestrzeni, oznacza to, że obszar monitorowania wykracza poza maksymalną przestrzeń ruchową robota. W przypadku zbliżania się człowieka do obszaru pracy robota na podstawie informacji z systemu detekcji spowalnia ruch robota do prędkości bezpiecznych, wynikających z oceny ryzyka. Mechanizm jest następujący, cobot działa z pełną prędkością, jeśli żaden człowiek nie znajduje się w zielonej strefie, robot działa ze zmniejszoną prędkością, gdy człowiek zbliża się do robota (w żółtej strefie), a zatrzymuje się, gdy człowiek dotrze do czerwonej strefy [3]. Wartości prędkości są ograniczone i monitorowane w trakcie całego czasu naruszenia obszar pracy robota. Dodatkowo robot utrzymuje odległość separacji pomiędzy swoimi elementami a wykrytym w strefie człowiekiem. Odległość separacji jest

uzależniona od aktualnej prędkości robota i zdolności człowieka do pokonania tej odległości w czasie [31]. Aby uzyskać kompromis w zakresie produktywności, można zdefiniować wielopoziomowe prędkości lub ograniczenia odległości, aby płynnie zmieniać prędkości ruchu [32]. Ponadto w sytuacji konieczności kontynuacji procesu, pomaga również w optymalizacji trajektorii ruchu, aby uniknąć możliwych kolizji [33]. Kiedy odległość separacji nie może być dłużej zachowana, wówczas robot przechodzi w bezpieczne kontrolowane zatrzymanie (podobnie jak opisano to w metodzie 1) [31]. Jest to metoda pracy stosowana najrzadziej ze względu na nadal istniejące ograniczenia w zakresie rozwiązań bezpieczeństwa. Oczywiście częściowo taka współpraca może być zapewniona z wykorzystaniem już istniejących rozwiązań optycznych w dziedzinie bezpieczeństwa maszyn. Natomiast docelowo niezbędne jest tu rozwiązanie, które będzie dynamicznie reagować na ruchy człowieka w przestrzeni pracy robota i jej sąsiedztwie [31]. Opis tej aplikacji obrazuje rysunek 28.

Metoda 4 jest dedykowana pracy przy użyciu robotów współpracujących. Dzięki specjalnie zaprojektowanym robotom siła nacisku lub moc jest ograniczona, aby uniknąć potencjalnego urazu człowieka lub kontaktu z inną przeszkodą. Wartości graniczne mocy i siły dla bezpiecznej współpracy podano w ISO/TS 15066. W przypadku wykrycia kontaktu uruchamiane są albo hamulce silnika cobota, albo uruchamiany jest tryb sterowania momentem obrotowym z kompensacją grawitacji w celu ograniczenia siły nacisku lub mocy [3]. Z punktu widzenia bezpieczeństwa kluczowe jest tutaj ograniczenie parametrów ruchu do wartości progowych przyjętych na etapie oceny ryzyka [31].

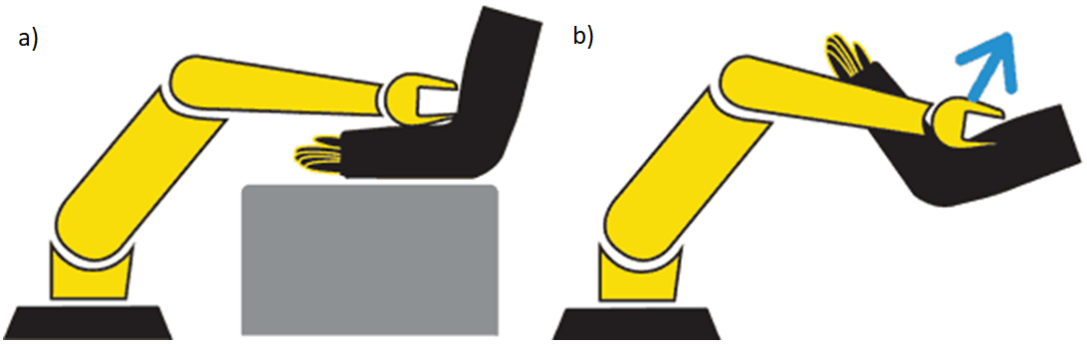
Wyposażenie robotów współpracujących obejmuje między innymi sensory umożliwiające detekcję bliskich obiektów oraz wykrywanie kontaktu (kolizji) z innym przedmiotem lub człowiekiem. Systemy tego typu dodatkowo mogą odbierać wrażenia dotykowe. Ponadto część z oferowanych obecnie cobotów potrafi zmieniać swoją trajektorię ruchu w zależności od kontaktu z przeszkodą (np.: AURA firmy Comau). Jak już wspomniano wcześniej dzięki wbudowanym systemom wizyjnym możliwe jest przewidywanie ruchów osoby w obszarze działania cobota, co zwiększa poziom bezpieczeństwa. Z drugiej strony robot potrafi się uczyć i przewidywać reakcje człowieka co podnosi komfort pracy pracowników, monitorowanie obszaru roboczego umożliwia zestaw skanerów laserowych.

W specyfikacji ISO/TS 15066, w oparciu o wcześniej określone siły, zostały zdefiniowane dwa typy kontaktu operatora z systemem robotycznym:

- **kontakt krępujący** (ang. quasi-static contact) – część ciała znajduje się między manipulowanym obiektem na ramieniu robota a innym obiektem,
- **kontakt przejściowy** (ang. transient contact) – część ciała nie jest zaciśnięta i można ją wycofać.

Oba odnoszą się do interakcji pomiędzy operatorem a częścią systemu zrobotyzowanego, schematycznie pokazano to na rysunku 29. Kontakt krępujący to taki, w wyniku którego część ciała operatora może zostać zaciśnięta pomiędzy częścią ruchomą a innym elementem stałym lub ruchomym celi. W kontakcie przejściowym część ciała operatora nie ulega zakleszczeniu, a jedynie

odrzuceniu lub operator może ją wycofać spod elementu ruchomego systemu zrobotyzowanego (np.: ramienia robota).



Rys 29. Rodzaje kontaktu człowieka z systemem robotycznym: a) kontakt krępujący, b) kontakt przejściowy [4].

Na potrzeby opracowania specyfikacji przeprowadzono badania wrażliwości części ciała człowieka na ból w przypadku kontaktu z maszyną. Uzyskano dane na temat poziomu początku bólu (ang. Pain Onset Level). Testowano 29 ściśle określonych punktów na ciele człowieka (m.in. skroń, mostek, opuszki palca wskazującego). Newralgicznym obszarem ciała jest oczywiście twarz, gdzie graniczne wartości siły wynoszą 65 N oraz nacisku równego 110 N/cm^2. Wartości progowe nacisków powierzchniowych i sił dla kontaktu przejściowego – uderzenia ustalono jako dwukrotnie większe niż wartości ustalone dla kontaktu krępującego. Różnica wynika głównie z założenia, iż kontakt przejściowy ustaje po krótkim okresie czasu – maksymalnie 0,5 s. W takim okresie czasu człowiek jest w stanie wytrzymać działanie większych sił. Zaprezentowane w załączniku A normy ISO/TS 15066 wyznaczone wartości powinny mieć charakter orientacyjny.

Istotnymi parametrami dla integratora robota współpracującego, są najczęściej prędkość i moment obrotowy. Załącznik A do ISO/TS 15066 zawiera wzory dzięki którym możliwe jest określenie, wartości tych parametrów. Istotne bowiem jest aby nie przekraczać wartości progowych nacisków powierzchniowych i sił robota współpracującego dla obydwu typów kontaktu w różnych częściach przestrzeni. Należy podkreślić, że przed nastawami konieczne jest świadome określenie na etapie projektu i oceny ryzyka, w jakich obszarach możliwe są interakcje części ciała z poruszającym się ramieniem robota, uwzględniając przy tym oprzyrządowanie technologiczne robota oraz przedmiot obrabiany. Drugim kluczowym aspektem będzie rozróżnienie typu potencjalnego kontaktu. Kolejnym istotnym czynnikiem będą kształty i powierzchnie poddane potencjalnemu kontaktowi, a w konsekwencji decyzja, czy należy utrzymać progową wartość nacisku powierzchniowego czy siły [31].

Z punktu widzenia wymagań formalnych Przy budowaniu stanowiska wyposażonego w robota współpracującego warto zweryfikować, jak przez producenta został zakwalifikowany konkretny robot współpracujący i czy posiada certyfikat zgodności. Tylko bezpieczna maszyna lub

aplikacja może być oznakowana znakiem CE i również dla takiej poprawne jest wystawienie Deklaracji zgodności WE. W specyfikacji ISO/TS 15066 podkreślono istotną rolę przyszłego użytkownika aplikacji wyposażonej w robota współpracującego, który powinien uczestniczyć w ocenie ryzyka i projektowaniu stacji roboczej. Na integratorze spoczywa odpowiedzialność za koordynację udziału użytkownika oraz wybór systemu zrobotyzowanego, w zależności od wymagań dla tej aplikacji. W przypadku identyfikacji wartości nieakceptowalnych podczas oceny ryzyka, należy podjąć działania zmierzające do redukcji ryzyka. Oprócz środków i rozwiązań bezpieczeństwa związanych z cobotem, dalszą redukcję ryzyka można osiągnąć poprzez zastosowanie tzw. bezpiecznych narzędzi, możliwości absorbcji energii (np.: gumowe okładki ramienia robota), amortyzowanie, stosowanie podatnych połączeń, rozwiązania związane ze zwiększeniem powierzchni kontaktu, ograniczenie przenoszonych mas itp. Jeżeli wyczerpane zostały wszelkie powyższe rozwiązania, niezbędne będzie zastosowanie klasycznych środków redukcji ryzyka znanych z innych rodzajów maszyn i aplikacji, takich jak osłony czy inne urządzenia ochronne [31].

Przy doborze rozwiązań redukujących ryzyko warto wspierać się normami zharmonizowanymi z Dyrektywą Maszynową 2006/42/WE [9] oraz dedykowaną dla tego typu robotów specyfikacją techniczną ISO/TS 15066 [31]. Podsumowując należy stwierdzić, że aby bezpiecznie wdrożyć robota współpracującego, konieczna jest dobra współpraca pomiędzy integratorem i użytkownikiem systemu zrobotyzowanego. W trakcie tej współpracy kluczowym etapem jest faza projektowania i oceny ryzyka, w której aktywnym uczestnikiem powinien być przyszły użytkownik.

4.1 Normy

Podstawowe normy regulujące konstrukcję i zabezpieczenia robotów kolaboracyjnych:

1. Dyrektywa maszynowa 2006/42/WE
2. ISO/TS 15066 Safety Requirements for Industrial Robots.
3. PN-EN ISO 12100 - Bezpieczeństwo maszyn -- Ogólne zasady projektowania
4. PN-EN ISO 10218-1 Roboty i urządzenia dla robotyki. Wymagania bezpieczeństwa dla robotów przemysłowych – Część 1: Roboty.
5. PN-EN ISO 10218-2 Roboty i urządzenia dla robotyki. Wymagania bezpieczeństwa dla robotów przemysłowych. Część 2: System robotowy i integracja.
6. PN-EN ISO 13849-1 Bezpieczeństwo maszyn. Elementy systemów sterowania związane z bezpieczeństwem. Część 1: Ogólne zasady projektowania.
7. PN-EN 61800-5-2 Elektryczne układy napędowe mocy o regulowanej prędkości – Część 5-2: Wymagania dotyczące bezpieczeństwa – Funkcjonalne.

5 Wybrane zagadnienia konstrukcyjne

Specyfikacja techniczna ISO/TS 15066 dostarcza szczegółowych wskazówek co do maksymalnych dozwolonych prędkości oraz minimalnego dystansu separacji. W takich systemach utrzymywany jest minimalny dystans pomiędzy robotami a ludźmi, aby nie doprowadzić do ich kontaktu. W takim systemie robot jest zintegrowany z urządzeniem ochronnym, które wyczuwa ruchy człowieka. W momencie wykrycia ruchu człowieka robot odsuwa się od niego lub „*tańczy*" z nim, np. gdy zrobisz krok do przodu, robot cofa się o krok. Specyfikacja techniczna ISO/TS 15066 zawiera również informacje na temat bezpiecznej konstrukcji robotów współpracujących.

5.1 FreeMove

System FreeMove, opracowany przez Veo Robotics, pozwala przystosować każdego robota przemysłowego do pracy w trybie kolaboracyjnym.

System, spełniający normę ISO 13849, pojawi się w ofercie komercyjnej w roku 2021.
Ideą systemu FreeMove jest zapewnienie separacji pomiędzy osobami znajdującymi się w obszarze pracy systemu i ruchomymi elementami maszyn (robotów przemysłowych) poprzez obserwację ruchu i predykcyjny pomiar odległości pomiędzy aktorami.

System składa się z trzech podstawowych elementów:

a) FreeMove Sensors®: czujniki wizyjne 3D TOF (z pomiarem odległości do obserwowanych obiektów) zamontowane tak, że obejmują swoim zasięgiem cały obszar celi (chronionego stanowiska pracy),
b) FreeMove Engine®: redundantny system komputerowy z oprogramowaniem zapewniającym stałą, zgodną z normą ISO 15066, obserwację prędkości i separacji (odległości) pomiędzy człowiekiem i ruchomymi elementami celi (np robot wraz z elementami w chwytaku),
c) FreeMove Studio®: oprogramowanie do konfiguracji i obserwacji pracy systemu.

Zastosowanie separacji pomiędzy człowiekiem i maszyną jako metody zapewnienia bezpieczeństwa pozwala przekształcić każdą standardową celę z robotem przemysłowym w system kolaboracyjny typu sekwencyjnego (Rys. 30). Dzięki niezależnemu od robota, zewnętrznemu systemowi obserwacji nie jest wymagana instalacja dodatkowych czujników na robocie. System chroni człowieka znajdującego się wewnątrz obserwowanej celi nie tylko przed kontaktem z samym robotem (jak w przypadku Tactile Skin lub podobnych rozwiązań), ale również przed kontaktem ze wszystkimi elementami związanymi z robotem (elementy chwytaka, przenoszony przez robota ładunek, ruchome oprzyrządowanie, itp.). System działa w sposób predykcyjny - przewiduje zdarzenia na podstawie relacji pomiędzy obserwowanymi obiektami (człowiekiem i robotem) uwzględniając prędkości i kierunki ruchu oraz czas potrzebny na zatrzymanie robota.

Rys 30. FreeMove (Veo Robotics) wykorzystuje sygnały z czujników 3D TOF do utrzymania bezpiecznej odległości między człowiekiem i elementami robota [34]

Więcej informacji:
Veo Robotics: https://www.veobot.com/freemove
Collaborative Robot Safety (PackWorld):
https://www.packworld.com/home/article/21141063/collaborative-robot-safety
Cageless robot system safeguards workers:
https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/cageless-robot-system-safeguards-workers
Prezentacja Veo Robotics na targach Pack Expo 2020:
https://peconnects20.mapyourshow.com/8_0/exhibitor/exhibitor-details.cfm?exhid=12418293&featureid=2990

5.2 APAS

APAS (Automatic Production Assistant) to system zabezpieczenia robotów przemysłowych opracowany przez Bosch-Rexroth. System pozwala przystosować robota przemysłowego do pracy w kolaboracyjnej (koegzystencja, współpraca szeregowa) wykorzystujący układ wizyjny w kiści robota i czułą na dotyk otulinę całego robota (Rys. 31). System jest przeznaczony głównie do małych robotów przemysłowych.

Kamera 3D (montowana w pobliżu narzędzia robota) systemu zabezpieczenia robota może również pełnić funkcje produkcyjne - możliwe jest wykorzystanie jej do rozpoznawania części, inspekcji czy rozpoznawania otoczenia robota.

System APAS, poza zabezpieczeniem robota, obsługuje również funkcje inspekcji i kontroli jakości, zbiera dane dotyczące wydajności produkcji, obsługuje komunikację z maszynami i urządzeniami poprzez sieci informatyczne.

Rys 31. System APAS (BOSCH) pozwala przystosować robota do pracy kolaboracyjnej [32]

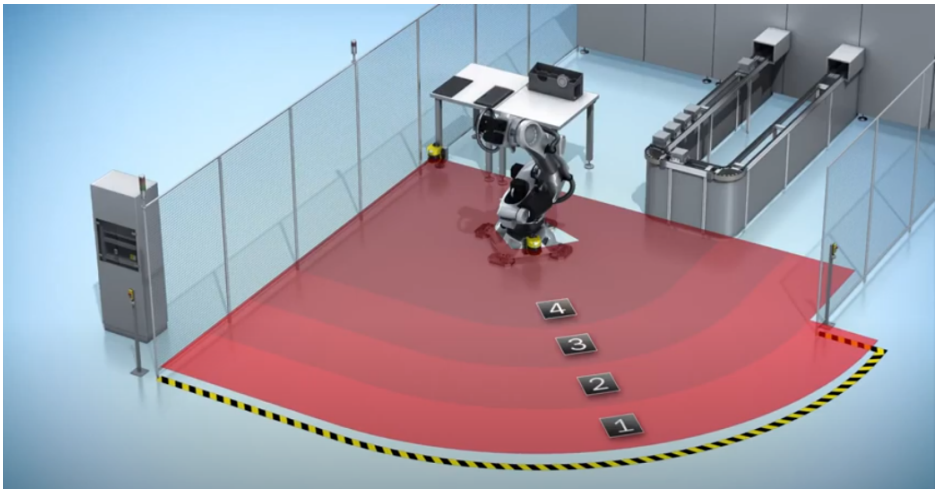
Więcej informacji:
BOSCH APAS: https://apps.boschrexroth.com/microsites/apas/
Bosch zmienia roboty we współpracowników:
https://www.bosch.pl/internet-rzeczy/local-przemysl/local-przemysl-artykuly/local-roboty-pracownicy.html

5.3 SRAP

SRAP (Safe Robotics Area Protection) to grupa produktów, oferowanych przez firmę Sick, przeznaczonych do ochrony stanowisk pracy robotów przemysłowych. Sick oferuje kilka systemów ochronnych:

- sBOT SPEED - system ograniczający prędkość robota gdy człowiek znajdzie się w chronionym obszarze pracy robota (Rys. 31),
- sBOT STOP - system zatrzymujący maszynę (robota) gdy w chronionym obszarze pojawi się człowiek.

W systemie zabezpieczeń wykorzystuje się między innymi skanery laserowe, podobne do tych, które są używane do zabezpieczania pojazdów autonomicznych i tradycyjnych, wygrodzonych obszarów pracy robotów i maszyn przemysłowych. System spełnia normę EN ISO 10218-2.



Rys 32. System sBOT SPEED ogranicza prędkość ruchów robota jeżeli w chronionym obszarze znajdzie się człowiek. [33]

Wszystkie systemy pozwalają na zorganizowanie stref chronionych z wolnym dostępem do robotów (lub chronionych maszyn). Ułatwia to pracownikom wykonywanie koniecznych zadań w pobliżu maszyn bez obawy o bezpieczeństwo i bez utrudnień, jakimi zwykle są płoty i furtki w tradycyjnych systemach. Robot zwolni, gdy człowiek znajdzie się w zewnętrznej strefie chronionego obszaru pracy maszyny (Rys. 32). Gdy człowiek podejdzie bliżej, wchodząc w kolejne strefy, robot zwolni jeszcze bardziej, aż w końcu zatrzyma się. Po wyjściu człowieka z obszaru chronionego, robot automatycznie powróci do normalnej pracy. To pozwala zmniejszyć straty spowodowane przestojem maszyn z powodu naruszenia strefy bezpieczeństwa i upraszcza procedury związane z poruszaniem się osób po hali produkcyjnej.
Dodatkową zaletą takiego podejścia jest wyeliminowanie gwałtownych zatrzymań robota - typowych dla tradycyjnego systemu zabezpieczeń, w którym przerwanie obwodu bezpieczeństwa powoduje natychmiastowe zatrzymanie maszyn. Łagodne, stopniowe zatrzymanie robota poprawia bezpieczeństwo procesów (ładunek robota nie jest poddawany gwałtownym zmianom przyśpieszenia) i sprzyja poprawie trwałości i niezawodności maszyn.
System może pracować z robotami przemysłowymi głównych producentów.

Więcej informacji:
Collaborative Robot Safety Made Simple:
https://sickusablog.com/collaborative-robot-safety-made-simple/#:~:text=sBOT%20SPEED%20%E2%80%93%20Safely%20Reducing%20Speed,controller%20for%20implementing%20safety%20logic.
Industry Report: Safety Systems in Industrial Automation:
https://roboticsandautomationnews.com/shop/books/industry-report-safety-systems-in-industrial-automation/

6 Przykładowe gniazda produkcyjne z robotami współpracującymi

6.1 Produkcja elementów elektronicznych

Zrobotyzowana linia do produkcji elementów elektronicznych w fabryce Quisda (Rys. 33). Zastosowana technika zabezpieczenia robotów: Tactile Skin - roboty przemysłowe zabezpieczone otuliną wrażliwą na dotyk

Rys 33. Sztuczna skóra wrażliwa na dotyk pozwala robotom pracować w bezpośredniej bliskości człowieka [34]

Źródło - International Federation of Robotics:
https://ifr.org/news/complete-human-robot-collaborative-production-line-with-t-skin-in-qisda

6.2 Inspekcja i pakowanie wyrobów - piły tarczowe Stihl

Roboty kolaboracyjne Fanuc wykonują część procedury kontroli jakości wyrobu oraz uwalniają pracowników od konieczności manipulowania produktem o dużej masie (Rys. 34).

Zastosowana technika zabezpieczenia robotów: sensory nacisku i momentu wbudowane w konstrukcję robota, system Collision Guard (Fanuc).

Rys 34. Roboty Fanuc CR-35iA wykonują razem z pracownikami procedurę kontroli jakości wyrobu w fabryce Stihl [34]

Źródło - International Federation of Robotics:
https://ifr.org/news/stihl-opens-up-new-avenues-with-fanucs-collaborative-robot

Więcej informacji:
Fanuc CR35iA:
https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots/collaborative-cr35ia
Fanuc, Safety functions for robots: https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/accessories/safety

6.3 Montaż zaworów - Weiss Kunststoffverarbeitung

Roboty Yaskawa wykonują część operacji montażu zaworów w fabryce Weiss Kunststoffverarbeitung.
Zastosowana technika zabezpieczenia robotów: podział czasu dostępu do przestrzeni roboczej, wyznaczone strefy bezpieczeństwa (Rys. 35).

Źródło - International Federation of Robotics:
https://ifr.org/news/collaborative-robot-cell-for-the-production-of-safety-valves

Rys 35. Montaż zaworów we współpracy z robotem [34]

Więcej informacji:
Kollaborative Roboterzelle für die Produktion von Sicherheitsventilen:
https://www.elektrotechnik.vogel.de/amp/kollaborative-roboterzelle-fuer-die-produktion-von-sicherheitsventilen-a-763449/

6.4 Dokręcanie śrub w czasie montażu silników spalinowych

Roboty SCR5 chińskiego producenta Siasun zostały wykorzystane do zautomatyzowania operacji dokręcania śrub w czasie procesu montażu bloków silników spalinowych. Operacja dokręcania wykonywana jest w czasie, gdy ludzie wykonują inne czynności przy tym samym bloku silnika (Rys. 36).

Zastosowana technika zabezpieczenia robotów to: sensory przyśpieszeń wbudowane w robota, strefy bezpieczeństwa.

Źródło - International Federation of Robotics:
https://ifr.org/news/siasun-collaborative-robot-helps-the-automobile-industry-to-chan

Więcej informacji:
Siasun, Collaborative robot SCR5:
https://www.siasun.cz/en/products/collaborative-robot-scr5-7axis/
https://www.siasun-in.com/en/goods/pro_detail/cid/5.html

Rys 36. Operacja dokręcania śrub wykonywana przez robota [34]

6.5 Pakowanie ziół w szklarni

Roboty Universal Robots wyposażone w chwytaki z sensorami nacisku pakują rośliny z hodowli do opakowań z folii i kartonu.

Zastosowana technika zabezpieczenia robotów: sensory nacisku i momentu wbudowane w konstrukcję robota oraz w mechanizm chwytaka.

Źródło:
International Federation of Robotics

https://ifr.org/news/collaborative-robots-in-the-greenhouse

Rys 37. Roboty kolaboracyjne UR wyposażone w chwytaki z sensorami nacisku pakują rośliny do pudełek [34]

6.6 Robot do chirurgii czaszki

CARLO - robot medyczny pozwalający zwiększyć dokładność i skuteczność ablacji laserowej (Rys 38).
Zastosowana technika zabezpieczenia robotów: sensory siły i dotyku w ramionach robota.

Rys 38. Robot kolaboracyjny do zabiegów ablacji laserowej [34]

Źródło - International Federation of Robotics:
https://ifr.org/news/collaborative-robots-will-shape-the-future-of-medicine

Więcej informacji:
AOT: AOT's CARLO® system works more precisely than a human being ever could. For that reason, it opens up the door to more gentle treatment possibilities. https://aot.swiss/en/carlo/

KUKA: LBR Med in medical technology: robotic laser system for bone surgery
https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2019/02/aot-ag

7 Zadania

Zadanie 1.

Proszę określić, jaki typ współpracy człowieka z robotem został zastosowany w przypadkach opisanych w rozdziale 6? Proszę uzasadnić odpowiedź.

Zadanie 2.

Dla robota współpracującego oblicz siłę uderzenia i moment siły rozpędzonego ramienia w przeszkodę. Prędkość ramienia robota w warunkach normalnych wynosi v = 1 m/s, masa ramienia robota wynosi m_r = 2 kg, masa przedmiotu zamocowanego na chwytaku wynosi m_p = 5 kg, zasięg pracy ramienia robota wynosi r = 0,5 m.

8 Literatura

8.1 Strony internetowe

International Federation of Robotics
strona internetowa: https://ifr.org/
kanał YouTube: https://www.youtube.com/channel/UCIdKFuqg5XxIPf_k2j4ZRfA/featured

8.2 Dokumenty cytowane w tekście

1. Winkler T. Komputerowo wspomagane projektowanie systemów antropotechnicznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2005.

2. Bieńkowski M. Kobot – przyszłość przemysłowej robotyki [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://automatykaonline.pl/Artykuly/Robotyka/Kobot-przyszlosc-przemyslowej-robotyki

3. Bi ZM, Luo M, Miao Z, Zhang B, Zhang WJ, Wang L. Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing. Robot Comput Integr Manuf [Internet]. Elsevier; 2020;67:102022. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584520302337?casa_token=BAI589AJNk8AAAAA:6-hK0xbiFkAqywpUJ4Y7GBRALvffnkrUdCKpHhXNcKOsl0XNtZQjQcpWPsYr98DNS49FJ8xOIA

4. Top Trends Robotics 2020 [Internet]. IFR Press Releases. Available from: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-trends-robotics-2020

5. Kaczmarek W, Panasiuk J. Wybrane konstrukcje robotów przemysłowych. Napędy i Sterowanie [Internet]. yadda.icm.edu.pl; 2018;20. Available from: http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-33e7ba8f-ed5d-4ce5-a34c-b069be0c8c3c

6. About the Baxter Robot [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: http://collabrobots.com/about-baxter-robot/

7. Spectrum I. Baxter [Internet]. 2018 [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://robots.ieee.org/robots/baxter/

8. Higher-quality. MDQ. Rethink Robotics meets German Engineering [Internet]. Available from: https://www.rethinkrobotics.com/fileadmin/user_upload/sawyer/rr-blackedition-brochure_low.pdf

9. Dyrektywa maszynowa 2006/42/WE [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://www.ce-polska.pl/dyrektywa-2006-42-we?gclid=Cj0KCQiA2uH-BRCCARIsAEeef3n4P4oPt29pDps

GqDlBvuIxKPsK3DwRgp9lPVe3BEck6gsyxnW-5JUaAo9MEALw_wcB

10. IRB 14000 YuMi - robot współpracujący - Roboty przemyslowe [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://new.abb.com/products/robotics/pl/roboty-przemyslowe/yumi

11. Faria C, Ferreira F, Erlhagen W, Monteiro S, Bicho E. Position-based kinematics for 7-DoF serial manipulators with global configuration control, joint limit and singularity avoidance. Mechanism and Machine Theory [Internet]. Elsevier; 2018;121:317–34. Available from: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X17306559

12. Prasowy M. (R)ewolucja robotyczna trwa! Roboty firmy KUKA [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://automatykaonline.pl/Artykuly/Robotyka/R-ewolucja-robotyczna-trwa!-Roboty-firmy-KUKA

13. Collaborative industrial robot FANUC CR-35iA [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots/collaborative-cr35ia

14. Siasun [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://www.siasun-in.com/en/goods/product_dujqr.html

15. Sześcioosiowy robot współpracujący do wspomagania operacji spawania ręcznego [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/14913--szescioosiowy-robot-wspolpracujacy-do-wspomagania-operacji-spawania-recznego

16. Nowy robot współpracujący o udźwigu 20 kg i zasięgu 1700 mm [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/14396-yaskawa-nowy-robot-wspolpracujacy-o-udzwigu-20-kg-i-zasiegu-1700-mm

17. Bezpieczny i precyzyjny robot współpracujący o łatwej obsłudze [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/14621-mitsubishielectric-bezpieczny-i-precyzyjny-robot-wspolpracujacy-o-latwej-obsludze

18. Eva - nowy robot współpracujący [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://automatykab2b.pl/produkty/wyposazenie-produkcyjne/roboty-i-manipulatory/10802-eva-nowy-robot-wspolpracujacy

19. Corobotics [Internet]. Available from: https://corobotics.pl/en/products/

20. Roboty do obsługi PCB/ICT [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://corobotics.pl/zastosowania/obsluga-pcb-ict/

21. Elektro praga [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from:

https://new.abb.com/products/robotics/pl/case-studies/elektro-praga

22. Khalil ISM, Alfar A, Tabak AF, Klingner A, Stramigioli S, Sitti M. Positioning of drug carriers using permanent magnet-based robotic system in three-dimensional space. 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) [Internet]. ieeexplore.ieee.org; 2017. p. 1117–22. Available from: http://dx.doi.org/10.1109/AIM.2017.8014168

23. Pawashe C, Floyd S, Diller E, Sitti M. Two-Dimensional Autonomous Microparticle Manipulation Strategies for Magnetic Microrobots in Fluidic Environments. IEEE Trans Rob [Internet]. ieeexplore.ieee.org; 2012;28:467–77. Available from: http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2011.2173835

24. Nelson BJ, Kaliakatsos IK, Abbott JJ. Microrobots for minimally invasive medicine. Annu Rev Biomed Eng [Internet]. annualreviews.org; 2010;12:55–85. Available from: http://dx.doi.org/10.1146/annurev-bioeng-010510-103409

25. Sitti M, Ceylan H, Hu W, Giltinan J, Turan M, Yim S, et al. Biomedical Applications of Untethered Mobile Milli/Microrobots. Proc IEEE Inst Electr Electron Eng [Internet]. ieeexplore.ieee.org; 2015;103:205–24. Available from: http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2014.2385105

26. Abbass H., Shoukry M.S., Misra S., Khalil I.S.M. Robust motion control of paramagnetic micro-particles against time-varying flow rates. Proceedings of the IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). Singapore; 2016;67–72.

27. El Zaatari S, Marei M, Li W, Usman Z. Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. Rob Auton Syst [Internet]. Elsevier; 2019;116:162–80. Available from: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092188901830602X

28. Pollak A, Paliga M, Pulopulos MM, Kozusznik B, Kozusznik MW. Stress in manual and autonomous modes of collaboration with a cobot. Comput Human Behav [Internet]. Elsevier; 2020;112:106469. Available from: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563220302211

29. Kaczmarek W, Panasiuk J. Systemy bezpieczeństwa na stanowiskach zrobotyzowanych. Napędy i Sterowanie [Internet]. yadda.icm.edu.pl; 2020;22. Available from: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-eb244f80-bea3-4595-902b-e0e57077396e

30. Charalambous G, Fletcher S, Webb P. The Development of a Scale to Evaluate Trust in Industrial Human-robot Collaboration. International Journal of Social Robotics [Internet]. Springer; 2016;8:193–209. Available from: https://doi.org/10.1007/s12369-015-0333-8

31. Głowicki M. Coboty – zagadnienia bezpieczeństwa przy integracji robotów współpracujących. Napędy i Sterowanie [Internet]. 2017 [cited 2019 Jun 21];R. 19, nr 4. Available from: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-f300e7e4-0046-4211-947e-a43e0516c66c/c/Glowicki.pdf

32. Lämmle A. Development of a new Mechanic Safety Coupling for Human Robot Collaboration using

Magnetorheological Fluids. Procedia CIRP [Internet]. Elsevier; 2019;81:908–13. Available from: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119305311

33. Zanchettin AM, Rocco P, Chiappa S, Rossi R. Towards an optimal avoidance strategy for collaborative robots. Robot Comput Integr Manuf [Internet]. Elsevier; 2019;59:47–55. Available from: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584518302886

34. FreeMove — Veo Robotics [Internet]. [cited 2020 Dec 15]. Available from: https://www.veobot.com/freemove

8.3 Spis rysunków

- Rys 1. Światowy, roczny zakup robotów przemysłowych (IFR)
- Rys 2. Podział robotów przemysłowych w latach 2017-2019 [4]
- Rys 3. Różne rodzaje współpracy człowieka z robotem przemysłowym [5]
- Rys 4. Roboty produkcja układów elektronicznych - przykład współpracy sekwencyjnej i koegzystencji człowieka i robota [5]
- Rys 5. Cobot Sawyer podczas uczenia [9].
- Rys 6. Roboty współpracujące firmy Universal Robots od lewej UR3e, UR5e, UR10e, UR16e [9,10]
- Rys 7. Przeguby robota UR3e: A – podstawa, B – ramię, C – łokieć, D, E, F – nadgarstek 1, 2, 3 [11]
- Rys 8. Zasięg pracy robota IRB 14000 YuMi widok z przodu [12]
- Rys 9. Chwytaki robota IRB 14000 YuMi® [13]
- Rys 10. Robot mobilny KUKA wraz z LBR iiwa [16]
- Rys 11. Seria robotów współpracujących Fanuc [18]
- Rys 12. Konstrukcja robota kolaboracyjnego Fanuc CR-35iA [17]
- Rys 13. Czujnik wizyjny FANUC [17]
- Rys 14. Coboty hybrydowe HCR20 oraz HSCR5 firmy Siasun DUCO [19].
- Rys 15. Robot współpracujący Yaskawa HC10XP i HC20XP firmy Yaskawa [20]
- Rys 16. Robot współpracujący Melfa Assista firmy Mitsubishi Electric z efektorami [23].
- Rys 17. Robot współpracujący Eva [17]
- Rys 18. Robot współpracujący HCR-5 (Corobotics)
- Rys 19. Robot współpracujący Fanuc CR-35ia przy montażu koła zapasowego [17]
- Rys 20. Robot współpracujący HCR3 firmy HANWHA Robotics w aplikacji PCB [25].
- Rys 21. Robot UR10 pracujący przy obsłudze obrabiarki CNC [26]

- Rys 22. Widok stanowiska montażu z robotem współpracującym YuMi® [27].
- Rys 23. System robotyczny LBR iiwa 7, a) ramię robota i cylindryczny magnes NdFeB, b) konfiguracja ramienia robota, c) niebieska trajektoria ruchu mikrocząstki [28].
- Rys 24. Urządzenie ręczne do nauki cobota Fanuc CR35ia [17].
- Rys 25. Podział obszaru działania na stanowisku pracy z robotem [4].
- Rys 26. Cztery typy aplikacji współpracujących [38,39].
- Rys 27. Typy współpracy człowieka z robotem [4] .
- Rys 28. Zobrazowanie 3 typu współpracy człowieka z robotem [4].
- Rys 29. Rodzaje kontaktu człowieka z systemem robotycznym: a) kontakt krępujący, b) kontakt przejściowy [4].
- Rys 30. FreeMove (Veo Robotics) wykorzystuje sygnały z czujników 3D TOF do utrzymania bezpiecznej odległości między człowiekiem i elementami robota
- Rys 31. System APAS (BOSCH) pozwala przystosować robota do pracy kolaboracyjnej [32]
- Rys 32. System sBOT SPEED ogranicza prędkość ruchów robota jeżeli w chronionym obszarze znajdzie się człowiek. [33]
- Rys 33. Sztuczna skóra wrażliwa na dotyk pozwala robotom pracować w bezpośredniej bliskości człowieka [34]
- Rys 34. Roboty Fanuc CR-35iA wykonują razem z pracownikami procedurę kontroli jakości wyrobu w fabryce Stihl [34]
- Rys 35. Montaż zaworów we współpracy z robotem [34]
- Rys 36. Operacja dokręcania śrub wykonywana przez robota [34]
- Rys 37. Roboty kolaboracyjne UR wyposażone w chwytaki z sensorami nacisku pakują rośliny do pudełek [34]
- Rys 38. Robot kolaboracyjny do zabiegów ablacji laserowej [34]

8.4 Spis tabel

- Tabela 1. Dane techniczne wybranych robotów kolaboracyjnych UR, ABB, Fanuc