

Laboratorium Podstaw Robotyki

Politechnika Poznańska
Katedra Sterowania i Inżynierii Systemów

ĆWICZENIE 2

PODSTAWY OBSŁUGI I PROGRAMOWANIA MANIPULATORA KR AGILUS

Celem ćwiczenia jest zapoznanie ze strukturą oraz sposobem działania i obsługi systemu sterowania z manipulatorem przemysłowym typu KR6 R900 sixx (KR AGILUS). Ćwiczenie prezentuje możliwości ruchowe manipulatora, zasady obsługi systemu z poziomu użytkownika (operatora), sposoby definiowania zadań i realizacji ruchu robota w różnych przestrzeniach, a także prezentuje sposób tworzenia i uruchamiania prostych programów użytkowych.

1 Przegląd elementów stanowiska zrobotyzowanego

Podstawowym elementem składowym stanowiska zrobotyzowanego jest robot (rys. 1-1):, którego parametry (np.: udźwig, powtarzalność) dobiera się w zależności od rodzaju aplikacji wykonywanej na stanowisku. Kolejnymi elementami są narzędzia przymocowane do robota bądź stojące oddzielnie. Innymi elementami często spotykanymi na stanowiskach zrobotyzowanych to uchwyty, stoły i pozycjonery. W celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy na stanowisku zrobotyzowanym wyposaża się je w urządzenia zabezpieczające (bariery i kurtyny świetlne, skanery laserowe, zamki bezpieczeństwa).

Kryteria doboru robota

- Udźwig
 - Obciążenie (Load): jest funkcją masy, momentu bezwładności oraz statycznych i dynamicznych sił wywieranych przez robota;
 - Nominalne obciążenie (Rated load): Maksymalne obciążenia, które mogą być wywierane na kołnierz robota w warunkach normalnej pracy (temperatura, wilgotność powietrza itp.) bez wpływu na jego wydajność;
 - Obciążenie dodatkowe (Supplementary load): obciążenie, które może być przymocowane do ramienia robota przed nadgarstkiem.
- Warunki pracy
 - Zastosowanie: Producent określa główny obszar(y) do których robot jest przeznaczony. Typowe zastosowania to manipulacja, montaż, zgrzewanie punktowe, spawanie, nanoszenie klejów lub uszczelniaczy, obróbka materiałów (frezowanie);
 - Normalne warunki pracy (środowisko): zgodnie z normą EN ISO 9946 producent określa wartości graniczne warunków otoczenia, w jakich określone cechy wydajności może osiągnąć robot. Wartości graniczne muszą być przestrzegane w celu uniknięcia szkód podczas magazynowania i obsługi robota. Podstawowe warunki otoczenia to: temperatura ($^{\circ}$ C), wilgotność względna powietrza (%), maksymalna wysokość n.p.m.(m), zakłócenia elektromagnetyczne.

- Powtarzalność i dokładność robota
- Dane przestrzenne
 - Zakres pracy: To część ograniczonej przestrzeni, która jest faktycznie używana podczas wszystkich ruchów określonych w aplikacji. Wielkość przestrzeni podawana jest dla nadgarstka.
 - Wymiary zewnętrzne i masa robota: Potrzebne między innymi przy wykonywaniu podłoża oraz przy transporcie.
 - Powierzchnia montażowa: Parametry powierzchni do której montuje się robota; niezbędne do zapewnienia bezpiecznej pracy.
 - Rysunek techniczny: wykonany zgodnie z normą ISO 9409-1.
- Prędkość robota - Wymagana prędkość robota jest związana z czasem trwania jednego cyklu pracy. Obliczanie czasu cyklu dokonuje się poprzez:
 - Szacowanie: niedokładna, ale szybka metoda. Szacowania opiera się na podstawie szkicu lub rysunku CAD. Wynik w dużej mierze zależy od doświadczenia.
 - Symulacja: modeluje się środowisko pracy robota oraz jego zadania w programie KUKA.Sim lub innym oprogramowaniu do symulacji robota (np.: Robcad). Metoda wysoce precyzyjna.
 - Testy na innym stanowisku: metoda wysokonakładowa (materiały, czas) ale umożliwia również kontrolę jakości i optymalizacji parametrów procesu.
- Bezpieczeństwo - System bezpieczeństwa robota musi spełniać wymagania zgodne z aktualną normą DIN EN ISO 10218.

1.1 Określić podstawowe parametry robota KR 6 R900 sixx na podstawie dokumentacji.

2 System sterowania z manipulatorem KR AGILUS

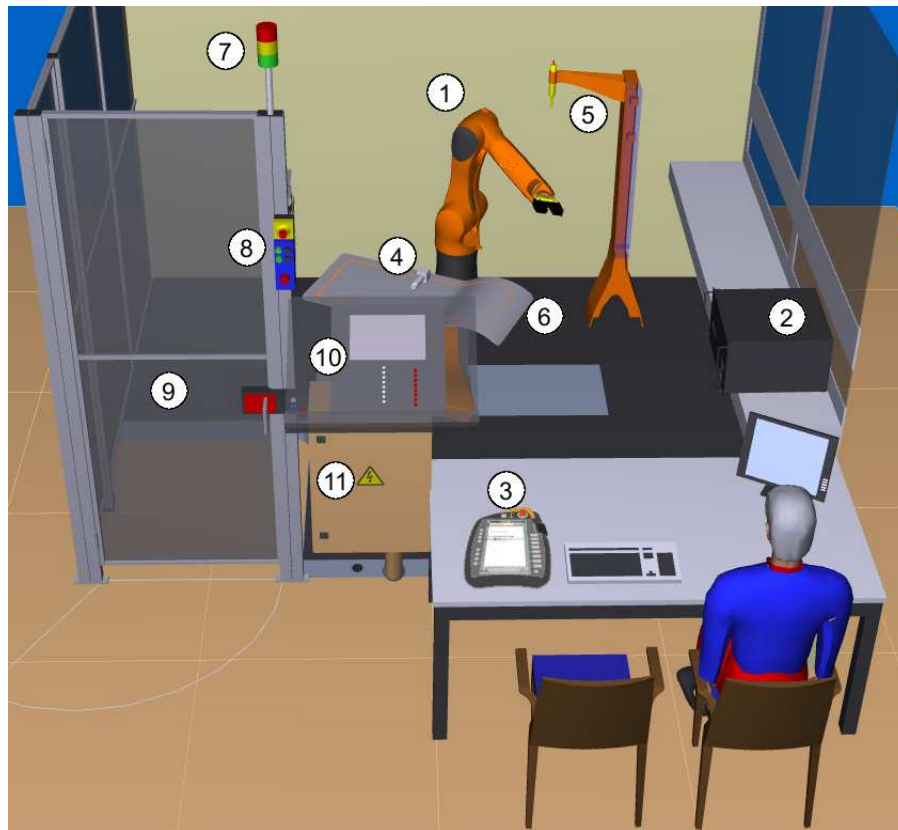
System sterowania KUKA składa się z następujących podstawowych elementów (rys. 2):

- szafy sterowniczej KR C4 zawierającej nadrzędny komputer sterujący, wzmacniacze mocy i sterowniki napędów oraz układy wejścia/wyjścia,
- ręcznego panelu sterującego smartPAD zwanego również KCP (skrót od słów: Kuka Control Panel),
- ramienia manipulacyjnego KR6 R900 sixx o sześciu stopniach swobody (element wykonawczy systemu).

Komputer główny sterownika KR C4 realizuje wszystkie obliczenia tzw. wysokiego poziomu, czyli zadanie kinematyki odwrotnej, generację trajektorii zadanych, obsługę sygnałów zewnętrznych, procedury obliczeniowe związane bezpośrednio z programem użytkownika oraz wizualizację i komunikację z operatorem. Programy użytkowe tworzy się z wykorzystaniem tzw. formularzy ruchu lub w przypadku użytkowników zaawansowanych za pomocą instrukcji języka KRL (Kuka Robot Language).

Standardowo dostęp programowy do systemu jest możliwy na jednym z dwóch poziomów:

- poziom *User* – kalibracja robota, kalibracja narzędzia, tworzenie i realizacja prostych programów użytkowych, realizacja ruchu w trybie *Teach And Repeat*,



Rysunek 1: Przykład stanowiska zrobotyzowanego: 1 - robot, 2 - szafa sterownicza, 3 - panel ręczny, 4 - narzędzie-pisak, 5 - narzędzie zewnętrzne, 6 - stół roboczy, 7- kolumna sygnalizacyjna, 8 - przyciski zabezpieczające oraz awaryjne, 9 - drzwi z zamkiem ryglującym, 10 - panel we/wy, 11 - szafa sterownicza dla systemu automatyki.

- poziom *Expert* – programowanie zaawansowane, tworzenie i realizacja złożonych struktur programowych, realizacja ruchu bez nauczania,

Ręczny panel sterujący KUKA smartPAD (nazywany również KCP - skrót od słów *Kuka Control Panel*) wyposażony jest w panel dotykowy oraz szereg klawiszy funkcyjnych. Spełnia on rolę interfejsu operatora z komputerem nadrzędnym i służy do tworzenia, modyfikacji i testowania programów użytkowych oraz do zmiany/wyboru parametrów całego systemu (3).

Dodatkowych i bardziej szczegółowych informacji związanych z systemem sterowania KUKA można znaleźć w literaturze [1]. W dalszej części uwaga zostanie skupiona na zasadach obsługi i możliwościach programowych systemu sterowania z manipulatorem KUKA AGILUS.

2.1 Uruchamianie systemu

Procedura uruchamiania systemu jest bardzo prosta i polega na załączeniu zasilania szafy sterowniczej dla systemu automatyki poprzez przekręcenie dużego pokrętła o 90 stopni w prawą stronę (1-11). Po tej czynności następuje ładowanie i inicjalizacja całego systemu, przy czym manipulator pozostaje w pozycji początkowej (zwykle jest to tzw. pozycja domowa *HOME*). Zasilanie napędów następuje automatycznie tylko podczas realizacji ruchu ramienia i wymaga załączenia jednego z przycisków zezwolenia znajdujących się na panelu KCP (patrz opis dalej).

Wyłączenie systemu polega na przekręceniu dużego pokrętła szafy o 90 stopni w stronę lewą. Po tej czynności automatycznie wykonywana jest procedura zapisu stanu i zamykania systemu.



Rysunek 2: Elementy systemu robota: 1 - Robot KR 6 R900 sixx (KR AGILUS), 2 - Szafa sterownicza KRC 4, 3 - Panel operatorski (KUKA smartPAD).

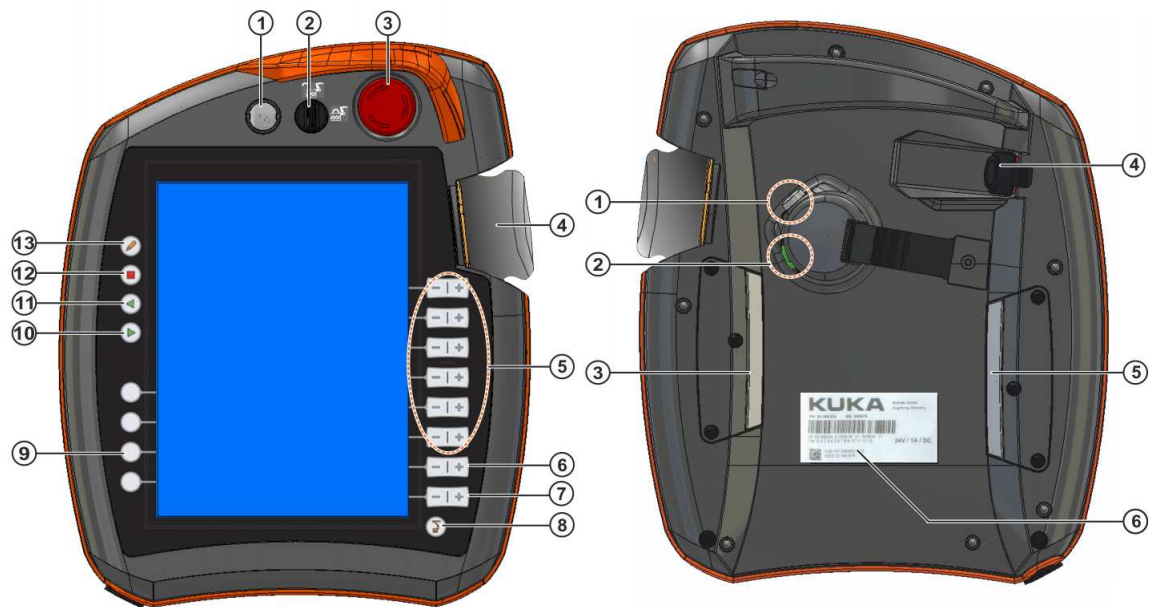
Wszystkie dane i stan systemu z chwili poprzedzającej wyłączenie zostanie zachowany i przywrócony po ponownym załączeniu zasilania.

2.2 Ręczny panel sterujący – KCP (*Kuka Control Panel*)

Podstawowym interfejsem użytkownika pozwalającym na komunikację ze sterownikiem głównym robota jest ręczny panel sterujący KCP. Za pomocą KCP użytkownik przeprowadza wszelkie operacje systemowe (pisanie i zapis programów, operacje na plikach itp.), zezwala na ruch manipulatora, steruje realizacją programów oraz wybiera bądź zmienia wartości parametrów systemu. Panel sterujący przedstawiono na rys. 3, gdzie oznaczono podstawowe grupy przycisków wykorzystywanych podczas obsługi systemu. Ich opis zawiera tabela 1.

Za pomocą stacyjki służącej do zmiany trybu pracy systemu (oznaczona numerem 2 na rys. 3) uzyskujemy dostęp do czterech trybów pracy, które mają bezpośredni wpływ na ruch robota oraz sposób realizacji programów użytkowych:

- tryb **T1** (Test1) – jest to pierwszy tryb testowy, w którym prędkość ruchu końcówki manipulatora jest ograniczona (zarówno przy ruchu ręcznym jak i podczas wykonywania programu) do wartości $0.250[m/s]$; aby ruch był możliwy przycisk *Enable switch* musi pozostawać wciśnięty (rozmieszczenie tych przycisków przedstawia rys. 3.b),
- tryb **T2** (Test2) – jest to drugi tryb testowy, w którym prędkość ruchu końcówki manipulatora przy ruchu ręcznym jest ograniczona do wartości $0.250[m/s]$; podczas wykonywania programu prędkość ruchu końcówki robota nie jest dodatkowo ograniczana i wynika z wartości parametru POV; aby ruch był możliwy przycisk *Enable switch* musi pozostawać wciśnięty (rozmieszczenie tych przycisków przedstawia rys. 3.b),
- tryb **AUT** (Automatic) – jest to tryb automatycznego wykonywania programu z prędkością ustawioną w programie użytkownika; aby rozpocząć realizację ruchu, należy załączyć napędy oraz uruchomić program (przycisk 10 na rys. 3.a lub 2 na rys. 3.b); podczas realizacji programu w tym trybie przycisk *Enable switch* nie musi być wciśnięty,



Rysunek 3: Panel operatorski KUKA smartPAD: a - widok z przodu; b - widok z tyłu (opis przycisków znajduje się w tab.1)

- tryb **AUT EXT** (Automatic External) – jest to również tryb automatycznego wykonywania programu i posiada prawie wszystkie cechy trybu Auto; jedyną różnicą jest źródło sygnału START uruchamiającego wykonanie programu, które pochodzi z zewnętrznych urządzeń automatyki.

Przycisk E-STOP (oznaczony numerem 3 na rys. 3.a) służy do natychmiastowego zatrzymania manipulatora. Przycisku tego należy użyć zawsze wtedy, gdy zachodzi niebezpieczeństwo zagrożenia zdrowia lub życia operatora, niebezpieczeństwo uszkodzenia elementów stanowiska zrobotyzowanego lub samego manipulatora!



UWAGA! Kontakt robota z człowiekiem grozi poważnym uszkodzeniem ciała! **PAMIĘTAJ!** Robot jest zawsze silniejszy od ciebie!

2.3 Układy współrzędnych

W systemie KUKA wyróżnia się cztery rodzaje układów współrzędnych, w których można realizować ruch manipulatora oraz definiować zadanie (rys. 4):

- I. osiowy układ współrzędnych (*Axis-specific coordinate system*) – związany z sześcioma osiami obrotu w złączach manipulatora,
- II. globalny układ współrzędnych (*WORLD coordinate system*) – układ związany na stałe z nieruchomą podstawą robota,
- III. bazowy układ współrzędnych (*BASE coordinate system*) – układ związany z detalem lub punktem przestrzeni roboczej,
- IV. układ współrzędnych narzędzia (*TOOL coordinate system*) – układ związany z narzędziem robota.

Widok z przodu	
Numer	Opis
1	Przycisk do odłączania panelu od robota
2	Stacyjka do zmiany trybu pracy robota
3	E-STOP – Wyłącznik awaryjny. Zatrzymuje robota w sytuacjach niebezpiecznych
4	Myszy 6D – pozwala na ręczne sterowanie robotem
5	Przyciski do ręcznego sterowania robotem
6	Przyciski do ustawiania prędkości robota w czasie wykonywania programu
7	Przyciski do ustawiania prędkości robota w czasie sterowania ręcznego
8	Główny klawisz menu
9	Klawisze związane z obsługą chwytaka
10	Start – służy do uruchomienia programu
11	Start w tył – służy do uruchamiania programu do tyłu
12	STOP – używany jest do zatrzymania uruchomionego programu (w trybie Auto)
13	Klawiatura ekranowa - wyświetla klawiaturę ekranową. W większości sytuacji klawiatura wyświetlana jest automatycznie.
Widok z tyłu	
Numer	Opis
1	Przycisk zezwolenia
2	Start – służy do uruchomienia programu.
3	Przycisk zezwolenia
4	Interfejs USB
5	Przycisk zezwolenia
6	Tabliczka znamionowa

Tablica 1: Opis przycisków ręcznego panelu sterującego KCP (według rys. 3).

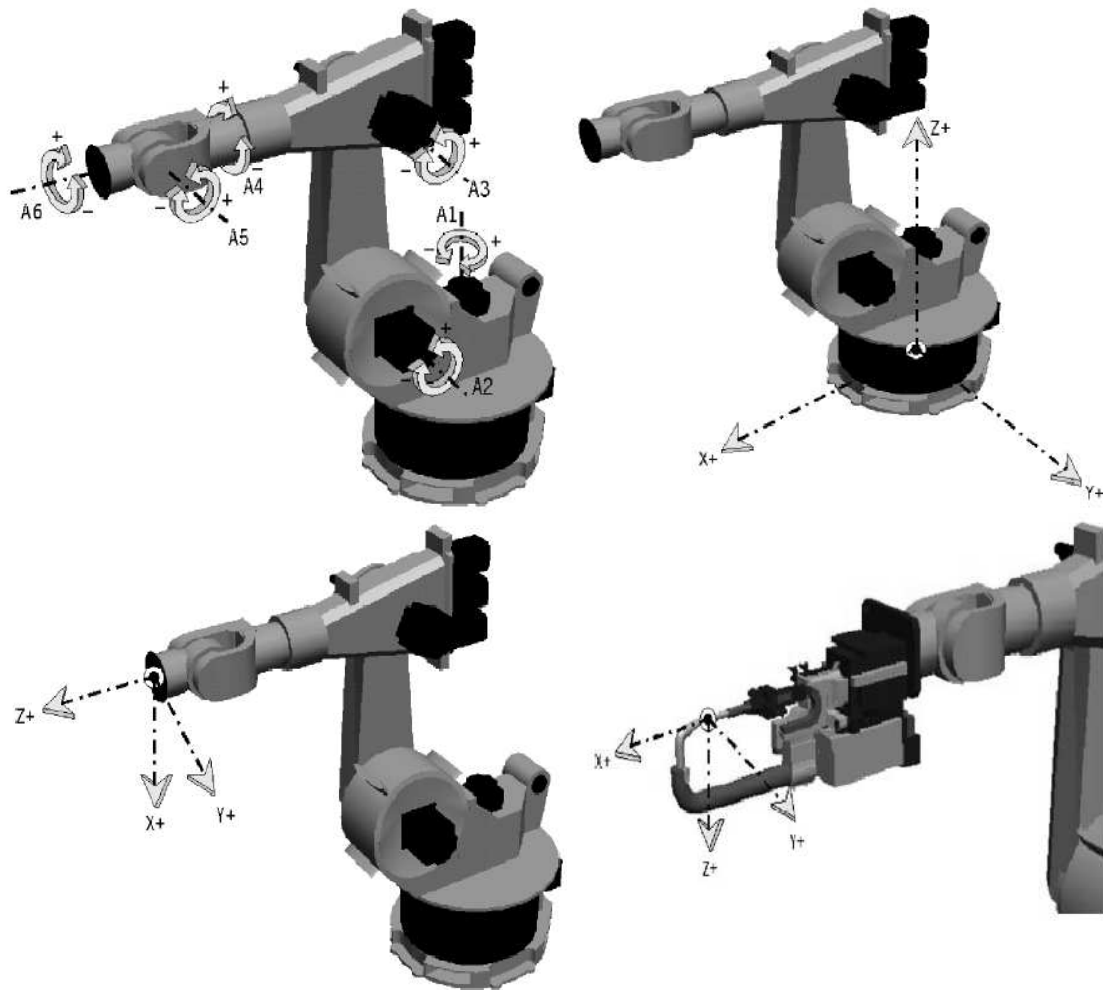
Wykorzystywanie poszczególnych układów wynika z konkretnych przesłanek praktycznych, przy czym ruch robota w trzech ostatnich układach wymaga uprzedniej kalibracji manipulatora. Układy II do IV mogą być definiowane przez użytkownika. Ruch manipulatora we wszystkich układach współrzędnych można zrealizować na dwa sposoby:

- stosując sterowanie ręczne z wykorzystaniem klawiszy wyboru (rys. 5) lub z wykorzystaniem myszy 6D (oznaczonej numerem 4 na rys. 3.a),
- realizując programową komendę ruchu (np. PTP, LIN, CIRC).

W celu wybrania układu współrzędnych należy nacisnąć przycisk wyświetlany na panelu dotykowym (rys. 6). Wybór rodzaju układu współrzędnych determinuje sposób realizacji ruchu.

Położenie dowolnego kartezjańskiego układu współrzędnych $\{U_1\}$ względem układu odniesienia $\{U_0\}$ jest reprezentowane w systemie KUKA jako zestaw sześciu parametrów określających współrzędne pozycji początku tego układu $\mathbf{p}_1^0 = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ względem pewnego układu odniesienia $\{U_0\}$ oraz orientację $\mathbf{O}_1^0 = \{A_1, B_1, C_1\}$ osi tego układu względem osi układu $\{U_0\}$. Orientacja \mathbf{O} jest reprezentowana w postaci zbioru trzech kątów Eulera oznaczonych jako A, B, C odpowiadających obrotom odpowiednio wokół ustalonych osi Z, Y, X układu odniesienia (patrz rys. 5).

Przywiązanie charakterystycznych układów współrzędnych (układ osiowy, układ globalny, układ narzędzia oraz układ końcówki kiści/kołnierza) przedstawiono na rys. 4.

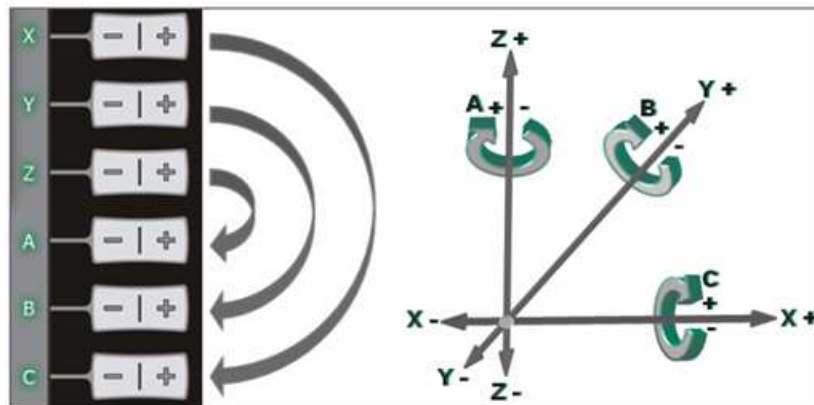


Rysunek 4: Sposób przywiązania osi układów współrzędnych: układ osiowy, układ globalny, układ kołnierza końcówki roboczej, układ narzędzia.

- 2.1 Przeprowadzić załączenie systemu. (włącznik szafy sterowniczej rys. 1-11)
- 2.2 Załączyć, zwolnić i potwierdzić przycisk E-STOP (wykorzystać przycisk E-STOP znajdujący się na panelu KCP).
- 2.3 Upewnić się że jest wybrany tryb pracy systemu T1 (dokumentacja [1] rys. 4-4:7). Jeżeli tak nie jest, poprosić prowadzącego o zmianę trybu pracy.
- 2.4 Zrealizować ruch manipulatora w przestrzeni osi (*Axis-specific*) oraz w układzie globalnym (*WORLD*), w układzie narzędzia (*TOOL*) i w wybranym układzie bazowym (*BASE*) za pomocą klawiszy oraz za pomocą myszy 6D. Realizację ruchów przeprowadzić dla różnych wartości prędkości maksymalnych końcówki (przycisk 7 na rys. 3.a).

2.4 Kalibracja narzędzia i układów bazowych

Kalibracja narzędzia robota polega na zdefiniowaniu i przypisaniu ortogonalnego układu współrzędnych do końcówki roboczej. Po zakończeniu kalibracji i wybraniu nowoskalibrowanego układu jako aktywnego, układ ten będzie wykorzystywany przy każdym odwołaniu się do pozycji i orientacji narzędzia podczas realizacji zadania. Układ współrzędnych narzędzia definiuje się względem



Rysunek 5: Przypisanie przycisków do osi układów współrzędnych.



Rysunek 6: Wybór układu współrzędnych.



UWAGA! Kontakt robota z człowiekiem grozi poważnym uszkodzeniem ciała! PAMIĘTAJ! Robot jest zawsze silniejszy od ciebie!

układu związanego z kołnierzem kiści robota (sposób przywiązania układu kołnierza przedstawiono na rys. 4). W systemie KUKA wyróżnia się dwie metody kalibracji pozycji narzędzia (metoda *XYZ 4-Point* oraz metoda *XYZ Reference*) czyli tzw. punktu TCP (Tool Center Point) oraz dwie metody kalibracji jego orientacji (metoda *ABC World* oraz metoda *ABC 2-Point*). Opis procedur kalibracji narzędzia zawiera dokumentacja [1]. Bazowe układy współrzędnych są zwykle definiowane i przywiązywane do gniazda roboczego (paleta, stół roboczy itp.) lub detalu. Przywiązanie takiego układu pozwala na definiowanie zadania w układzie lokalnym (bazowym). Po zmianie lokalizacji gniazda roboczego (przemieszczenie palety, zmiana położenia stołu) wystarczy jedynie przeddefiniować układ bazowy, a cała definicja zadania będzie nadal aktualna. Definiowanie i przywiązywanie układów bazowych nazywamy kalibracją tych układów. Kalibrację przeprowadza się tzw. metodą trzypunktową (*ABC 3-point*) opisaną w dokumentacji [1].



Rysunek 7: Wybór numeru narzędzia oraz bazy.



Rysunek 8: Resetowanie i wycofywanie wyboru programu.

Parametr	Robot przy drzwiach	Robot przy oknie
M	2,30	2,148
X	25,62	23,324
Y	3,57	1,306
Z	81,36	65,062
A	2,22	0,030
B	89,18	63,155
C	92,23	90,039
JX	0,00	0,008
JY	0,03	0,009
JZ	0,10	0,066

Tablica 2: Parametry chwytaków przymocowanych do robotów KR AGILUS

- 2.5 Umieścić metalowy pisak w chwytaku robota. **Uwaga na szczęki chwytaka! Zachować ostrożność!**
- 2.6 Zdefiniować i skalibrować metodą *XYZ 4-Point* nowe narzędzie o nazwie **SPisak** i zapisać je w systemie pod numerem **8** (wykorzystać opcje menu: *Start-up* → *Tool/base management*; opcja *Start-up* jest nieaktywna gdy jest otwarty program); W otwartym oknie wybieramy zakładkę *Tool Workpiece*. Następnie dodajemy narzędzie naciskając *Add*. W pierwszej kolejności wpisujemy numer narzędzia *No. 8* i jego nazwę *Name SPisak* opcję *Tool* pozostawiamy bez zmian. W polu *Transformation* naciskamy *Calibrate* i z rozwijanego menu wybieramy *XYZ 4-point*. Dojeżdżamy robotem do punktu referencyjnego. Zapisujemy pozycję naciskając *Touch-up*. Odjeżdżamy robotem (uważać by nie przesunąć punktu referencyjnego; gdyby tak się stało całą procedurę należy powtórzyć) i ponownie dojeżdżamy do punktu referencyjnego od innej strony (z inną orientacją narzędzia rys. 11). Procedurę tą wykonujemy dla 4 różnych ułożeń narzędzia. (Pojawienie się czerwonej ramki oznacza że różnica między orientacjami narzędzia są zbyt małe i należy powtórzyć pomiar jednego z punktów) Następnie zapisujemy dane wybierając *Save* i zamykamy okno przyciskiem *Cancel*.
- Kolejnym krokiem jest kalibracja orientacji narzędzia metodą *ABC World*. W tym celu ponownie naciskamy przycisk *Calibrate* a z rozwijanego menu wybieramy *ABC world*. Wybieramy pole *Perform TouchUp*. Obracamy narzędzie robota tak by jego oś **X** (zwykle oś natarcia narzędzia) pokrywała się z osią **Z** układu globalnego i była skierowana w przeciwną stronę i zatwierdzamy pozycję przyciskiem *Touch-up*. Następnie zapisujemy dane wybierając *Save* i zamykamy okno przyciskiem *Cancel*.
- W polu *Load data* dodajemy informacje o masie, położeniu środka ciężkości, orientacji osi głównych, momentach bezwładności (dane narzędzia podane są w tab. 2). Zapisujemy dane zmierzonego narzędzia przyciskiem *Save*. Zamykamy okno pomiaru narzędzia pomarańczowym przyciskiem *X*.
- 2.7 Po zakończeniu procedury kalibracji wybrać nowoskalibrowane narzędzie jako aktywne (rys. 7) i sprawdzić realizację ruchu końcówki manipulatora w układzie współrzędnych narzędzia (rys. 6).

- 2.8** Umieścić metalowy pisak w chwytaku robota. **Uwaga na szczęki chwytaka! Zachować ostrożność!**
- 2.9** Zdefiniować i skalibrować dwa układy bazowe zaznaczone na stole treningowym kolorem czerwonym. Definiowanym układom przypisać następujące nazwy i numery: **RedBase1** z numerem **8** oraz **RedBase2** z numerem **9**. Kalibrację zaczyna się od wybrania opcji menu: *Start-up* → *Tool/base management*. W otwartym oknie wybieramy zakładkę *Base Fixed tool*. Następnie dodajemy bazę naciskając *Add*. W pierwszej kolejności wpisujemy numer bazy *No. 8* i jego nazwę *Name RedBase1* opcję *Base* pozostawiamy bez zmian. W polu *Transformation* naciskamy *Calibrate* i z rozwijanego menu wybieramy *3-point*. Jako *Reference tool* wybieramy **8 SPisak**. Dojeżdżamy końcówką narzędzia (TCP) do środka kalibrowanego układu współrzędnych. Zapisujemy pozycję naciskając *Touch-up*. Następnie przemieszczamy końcówką narzędzia (TCP) do punktu leżącego na dodatniej części osi X kalibrowanego układu współrzędnych. Zapisujemy pozycję naciskając *Touch-up*. W kolejnym kroku przesuwamy końcówką narzędzia (TCP) do punktu leżącego na płaszczyźnie XY po dodatniej części osi Y kalibrowanego układu współrzędnych. Zapisujemy pozycję naciskając *Touch-up*. Zapisujemy dane zmierzonej bazy przyciskiem *Save*. Zamykamy okno przyciskiem *Cancel*. Powtarzamy procedurę dla kolejnej bazy (**9; RedBase2**). Zamykamy okno pomiaru bazy pomarańczowym przyciskiem *X*.
- 2.10** Po zakończeniu procedury kalibracji kolejno wybrać nowoskalibrowane układy bazowe jako aktywne (rys. 7) i sprawdzić realizację ruchu końcówki manipulatora w tych układach współrzędnych (rys. 6).

2.5 Utworzenie, wybór i wycofywanie wyboru programu

W celu utworzenia nowego programu w strukturze katalogów zaznaczyć folder, w którym utworzony ma zostać program, np. folder PR. Nacisnąć przycisk *New*. Wprowadzić nazwę programu i potwierdzić naciskając *OK*.

UWAGA: Nazwa programu musi być unikatowa w całym folderze R1. Jeżeli program nie utworzył się oznacza to, że podana nazwa już istnieje.

W celu wybrania programu należy nacisnąć przycisk *Select*. Aby zamknąć wybrany programu (wycofywanie wyboru) należy nacisnąć przycisk *Edit* i wybrać opcję *Cancel program* lub dotknąć litery R na pasku stanu a w otwartym oknie wybrać *Cancel program* (rys. 8).

UWAGA: Przy wycofaniu wyboru wszelkie zmiany w programie są zapisywane automatycznie; bez zapytania o potwierdzenie!

2.6 Programowanie ruchu manipulatora

Podstawowym sposobem określania pożądanego lokalizacji końcówki roboczej manipulatora w przestrzeni zadania jest metoda nauczania i odtwarzania punktów w tej przestrzeni (metoda *Teach And Repeat*). Nauczanie pojedynczego punktu (lokalizacji) polega na ręcznym przemieszczeniu końcówki robota do pożądanego punktu w przestrzeni zadania i zapamiętaniu go w pamięci sterownika. Odtwarzanie punktu polega na automatycznej realizacji ruchu manipulatora od punktu bieżącego do nauczonego punktu w przestrzeni zadania. Dokładność odtworzenia nauczonego wcześniej punktu nazywana jest powtarzalnością manipulatora. Ruch robota pomiędzy dwoma nauczonymi punktami wynika natomiast z przyjętej strategii zwanej interpolacją trajektorii. W systemie KUKA dostępne są trzy podstawowe rodzaje interpolacji determinujące trzy różne sposoby realizacji ruchu końcówki roboczej w przestrzeni zadania:

- interpolacja typu PTP (*Point To Point*) – końcówka prowadzona jest wzdłuż najszybszej ścieżki łączącej oba punkty,
- interpolacja typu LIN (*Linear*) – końcówka prowadzona jest wzdłuż prostej łączącej oba punkty w przestrzeni zadania,

- interpolacja typu CIRC (*Circular*) – końcówka prowadzona jest wzdłuż łuku okręgu łączącego oba punkty w przestrzeni zadania.

Podczas realizacji ruchu do danego punktu w przestrzeni zadania wszystkie napędy w złączach rozpoczynają i kończą ruch w tym samym czasie (tryb ruchu SYNCHRO), przy czym prędkość każdej z osi manipulatora dostosowuje się do prędkości ruchu najwolniej poruszającego się napędu. Realizacja ruchu z interpolacją PTP, LIN lub CIRC wymaga utworzenia i wykonania programu ruchu w systemie KUKA. Plik z nowoutworzonym programem domyślnie zawiera trzy niepuste linie komend (patrz rys. 9):

- komenda INI – ładowanie danych maszynowych do pamięci sterownika,
- komenda SPTP HOME – instrukcja ruchu do położenia domowego (HOME).

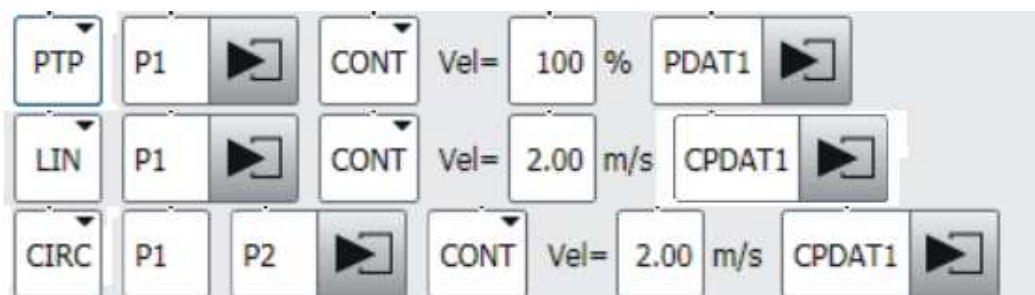
```

1 → INI
2
3 SPTP HOME Vel=100 % DEFAULT
4
5 SPTP HOME Vel=100 % DEFAULT

```

Rysunek 9: Domyślna postać nowoutworzonego pliku programu operatora w systemie KUKA.

Tworzenie programu operatora polega między innymi na wykorzystaniu i wstawieniu w ciało programu tzw. formularzy ruchu (rys. 10), które umożliwiają wybór podstawowych parametrów realizacji ruchu takich, jak: rodzaj interpolacji, punkt do realizacji w przestrzeni zadania, stopień dokładności odtwarzania punktu, prędkość ruchu oraz inne parametry ruchu (wykaz parametrów ruchu dla wszystkich trzech typów interpolacji wraz z zakresami wartości tych parametrów zestawiono na rys. 14).



Rysunek 10: Postać tzw. formularzy ruchu wykorzystywanych w programach ruchu.

W przypadku, gdy ruch manipulatora zdefiniowano w przestrzeni zadania za pomocą kilku punktów, wówczas realizację tych punktów można przeprowadzić na dwa sposoby:

- poprzez dokładny dojazd do każdego ze wskazanych punktów z krótkim zatrzymaniem robota po osiągnięciu każdego punktu,
- poprzez zgrubny lecz płynny przejazd w okolicy punktów pośrednich bez zatrzymywania końcówki w tych punktach (tylko ostatni punkt z listy zostanie osiągnięty precyzyjnie z zatrzymaniem manipulatora).

Wybór strategii realizacji przejazdu przez punkty pośrednie określa się bezpośrednio w formularzach ruchu (parametr CONT), a wielkość otoczenia punktów pośrednich przy realizacji przejazdu zgrubnego definiuje parametr *Approximation distance* (patrz rys. 14). Przykładowe kształty toru końcówki roboczej w przestrzeni zadania dla wszystkich typów interpolacji (PTP, LIN, CIRC) oraz dla dokładnej i zgrubnej realizacji punktów przedstawiono na rys. 12 oraz 13.

2.7 Uruchamianie i resetowanie programu

W celu uruchomienia programu w trybie ręcznym należy najpierw go wybrać (*Select*). Następnie przytrzymać jeden z przycisków zezwolenia (oznaczone numerem 1, 3 lub 5 na rys. 3.b) i poczekać, aż pasek stanu wyświetli informację "Drives ready". Wykonać przesuw BCO (Block Coincidence): Nacisnąć i przytrzymać przycisk Start, aż pojawi się okno komunikatu "Programmed path reached (BCO)". Robot zatrzyma się po dojechaniu do pierwszej pozycji zapisanej w programie (wykona pierwszą komendę ruchu, zazwyczaj PTP HOME).

UWAGA: Przesuw BCO odbywa się zawsze ruchem PTP, od pozycji rzeczywistej do docelowej. By nie dopuścić do kolizji, należy cały czas obserwować ruch robota!

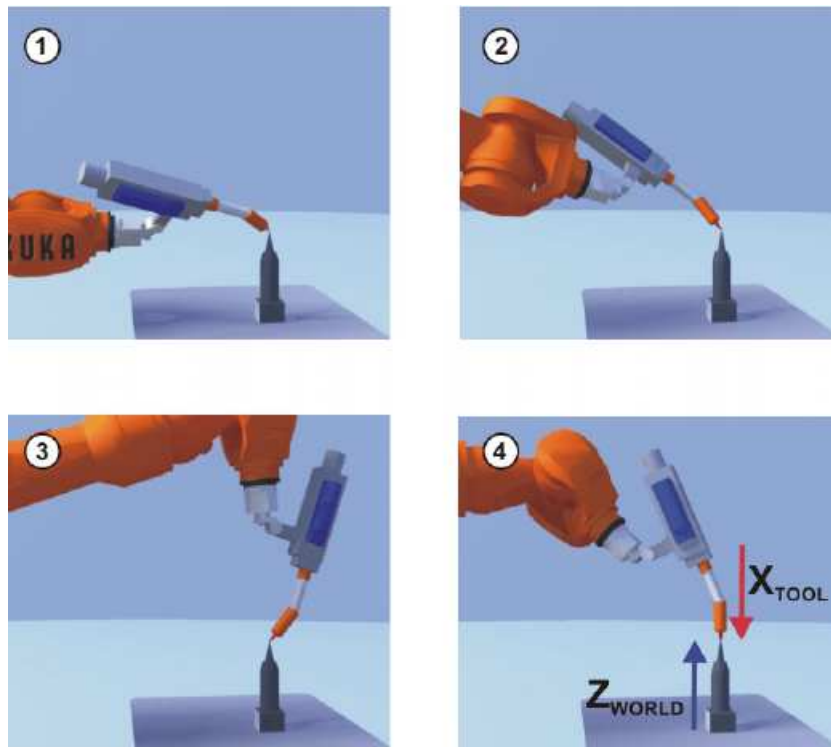
Następnie należy nacisnąć i przytrzymać przycisk *Start* (oznaczony numerem 10 na rys. 3.a) do czasu zakończenia programu.

Aby zatrzymać program uruchomiony w trybie ręcznym, należy zwolnić przycisk *Start*.

Aby ponownie uruchomić przerwany program od początku, należy go zresetować. W ten sposób program przywracany jest do stanu początkowego. W tym celu należy nacisnąć przycisk *Edit* i wybrać opcję *Reset program* lub dotknąć litery R na pasku stanu a w otwartym oknie wybrać *Reset program* (rys. 8).

- 2.11 Utworzyć program ruchu przemieszczający końcówkę roboczą pomiędzy trzema punktami w przestrzeni zadania (program utworzyć w folderze **R1\Program\Student\PR**). W wybranym programie (za pomocą przycisku *Select*) ustawić kursor pomiędzy komendami PTP HOME. Za pomocą panelu KCP przemieścić ramię manipulatora i nauczyć system trzech wybranych punktów P_1, P_2, P_3 z wyborem interpolacji PTP (opcja menu: *Commands* → *Motion* → *PTP*). Procedurę nauczania zrealizować z wybranym nowoskalibrowanym narzędziem *SPisak*. Punkty powinny znajdować się z dala od wszelkich przedmiotów znajdujących się w celi (min 30cm).
- 2.12 Przetestować wykonanie programu w trybie T1 (Test1) przy założeniu dokładnej realizacji wszystkich nauczonych punktów (wybrać właściwą opcję w formularzu ruchu – patrz rys. 14). Po stwierdzeniu poprawności realizacji ruchu, uruchomić program w trybie T2 (Test2) i ostatecznie w trybie AUT.
UWAGA: Test programu w trybie T2 oraz AUT jest dozwolony tylko przy zamkniętej bramce wejściowej do strefy pracy robota i pod nadzorem osoby prowadzącej zajęcia!
- 2.13 Porównać wykonanie powyższego programu przy założeniu zgrubnej realizacji punktów P_1, P_2 i P_3 (dokonać odpowiednich modyfikacji w formularzach ruchu – rys. 14).
- 2.14 Porównać wykonanie powyższego programu przy zmianie rodzaju interpolacji ruchu pomiędzy punktami P_1, P_2, P_3 na typ LIN z prędkością liniową końcówki $Vel=0.5[m/s]$ (testy wykonać dla dokładnej i dla zgrubnej realizacji punktów P_1, P_2, P_3).
UWAGA: Zachować ostrożność; interpolacja ruchów, w niektórych miejscach może przebiegać gwałtownie!
- 2.15 Wykonać program, w którym osiągnęte przez końcówkę roboczą nowe punkty P_1, P_2, P_3, P_4 będą tworzyły dwa połączone łuki okręgów (interpolacja typu CIRC), przy czym punkty P_1 i P_2 będą stanowić odpowiednio punkt pomocniczy i punkt końcowy pierwszego łuku, a punkty P_3 oraz P_4 odpowiednio punkt pomocniczy i punkt końcowy drugiego łuku (może zachodzić konieczność ponownego nauczania punktów P_1, P_2, P_3 tak, aby realizacja obu łuków była możliwa i manipulator nie osiągał ograniczeń pozycji kątowych w złączach. Punkt początkowy pierwszego łuku to pozycja HOME).

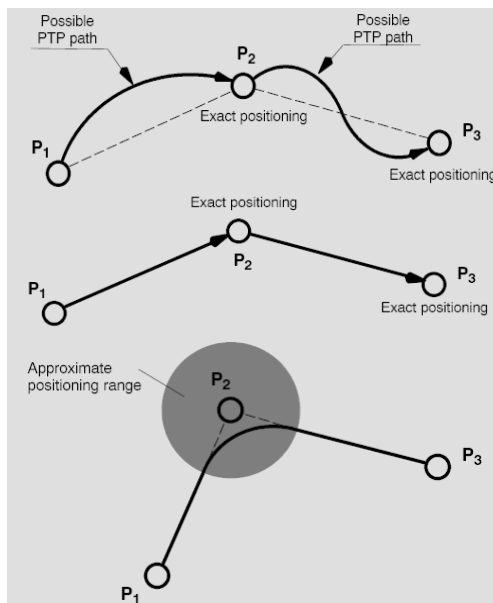
- 2.16** Utworzyć program ruchu przeprowadzający narzędzie robocze *SPisak* z prędkością $Vel=0.5[m/s]$ wzdłuż trójkątnego konturu znajdującego się wewnątrz okręgu wykreślonego na stole treningowym. Podczas tworzenia programu i nauczania punktów skorzystać z jednego ze zdefiniowanych wcześniej bazowych układów współrzędnych *RedBase1*, *RedBase2* związanych ze stołem treningowym. Przetestować program w trybie T1, T2 oraz AUT.
UWAGA: Test programu w trybie T2 oraz AUT jest dozwolony tylko przy zamkniętej bramce wejściowej do strefy pracy robota i pod nadzorem osoby prowadzącej zajęcia!
- 2.17** Zmodyfikować program tak, aby przeprowadzić narzędzie robocze z prędkością $Vel=0.5[m/s]$ wzdłuż drugiego (ukośnego) trójkątnego konturu znajdującego się na stole treningowym. Przetestować program w trybie T1, T2 oraz AUT.
- 2.18** Po skończonej pracy ustawić ramię manipulatora w pozycji domowej HOME realizując instrukcję programu *PTP HOME Vel=100% DEFAULT*.



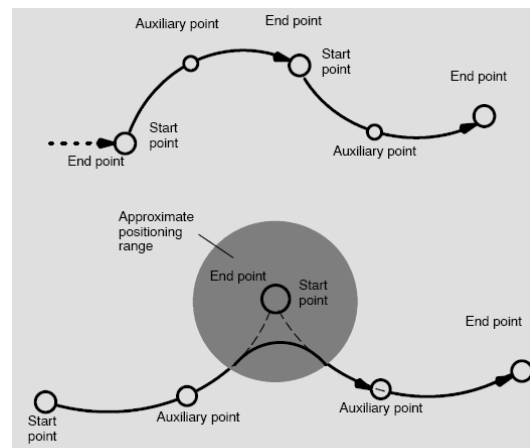
Rysunek 11: Metoda 4-punktowa XYZ.

Literatura

- [1] KUKA. *KUKA System Software 8.2*. KUKA Roboter GmbH, Augsburg, Niemcy, 18.02.2011.



Rysunek 12: Kształt ścieżki końcówki roboczej między punktami P_1, P_2, P_3 w przestrzeni zadania dla dwóch typów interpolacji PTP i LIN oraz wpływ omijania punktów pośrednich (pozycjonowanie przybliżone) na kształt toru końcówki (tu: dla interpolacji LIN).



Rysunek 13: Kształt ścieżki końcówki roboczej między wybranymi punktami w przestrzeni zadania dla interpolacji CIRC oraz wpływ omijania punktów pośrednich (pozycjonowanie przybliżone) na kształt toru końcówki.

Box name	Function	Range of values
PTP	Type of motion	PTP, LIN, CIRC
P1	Point name	Max. 23 characters
Tool	Tool number	Nullframe, Tool_Data[1]...[16]
Base	Workpiece number	Nullframe, Base_Data[1]...[16], EX_AX_DATA[1]...[6]
external TCP	Robot guides tool/workpiece	True, False
CONT	Approximate positioning ON	" ", Cont
Vel=100%	Velocity	1 to 100% of the maximum value (default: 100%)
PDAT1	Motion parameters	
Acceleration	Acceleration	0 ... 100
Approximation Distance *1	Approximate positioning range	0 ... 100
*1 Only available if "CONT" has been switched on		

Box name	Function	Range of values
LIN	Type of motion	PTP, LIN, CIRC
P1	Point name	Max. 23 characters
Tool	Tool number	Nullframe, Tool_Data[1]...[16]
Base	Workpiece number	Nullframe, Base_Data[1]...[16]
external TCP	Robot guides tool/workpiece	True, False
CONT	Approximate positioning ON	" ", Cont
Vel=2m/s	Velocity	0.001 ... 2 m/s (Default 2 m/s)
CPDAT1	Motion parameters	
Acceleration	Acceleration	0 ... 100
Approximation Distance *1	Approximate positioning range	0 ... 300
*1 Only available if "CONT" has been switched on		

Box name	Function	Range of values
CIRC	Type of motion	PTP, LIN, CIRC
P1	Auxiliary point name	Max. 23 characters
P2	Point name	Max. 23 characters
Tool	Tool number	Nullframe, Tool_Data[1]...[16]
Base	Workpiece number	Nullframe, Base_Data[1]...[16]
external TCP	Robot guides tool/workpiece	True, False
CONT	Approximate positioning ON	" ", Cont
Vel=2m/s	Velocity	0.001 ... 2 m/s (Default 2 m/s)
PDAT1	Motion parameters	
Acceleration	Acceleration	0 ... 100
Approximation Distance *1	Approximate positioning range	0 ... 300
*1 Only available if "CONT" has been switched on		

Rysunek 14: Opis i zakresy wartości parametrów realizacji ruchu zawartych w formularzach ruchu systemu KUKA.