

Wprowadzenie do robotyki

- **Robotyka** to nauka i technologia projektowania, budowy i zastosowania sterowanych komputerowo urządzeń mechanicznych popularnie zwanych **robotami**.

Robot – urządzenie mechaniczne, które może wykonywać rozmaite zadania manipulacyjne oraz lokomocyjne w sposób automatyczny.

- **Robotyka** może być zaklasyfikowana jako część szeroko rozumianej **automatyki przemysłowej**.

„**Robot**” w porównaniu do „automatu” jest urządzeniem wysoce elastycznym pod kątem możliwości programowania oraz zakresu wykonywanych ruchów.

Wprowadzenie do robotyki

- **Robotyka** jest gałęzią nowoczesnej technologii łączącą różne dziedziny nauk technicznych i nie tylko:
 - automatykę,
 - elektronikę, elektrotechnikę,
 - mechanikę,
 - inżynierię przemysłową,
 - informatykę,
 - matematykę.

Wprowadzenie do robotyki

- **Robotyka** jako dyscyplina naukowa zajmuje się przede wszystkim:
 - kinematyką robotów,
 - dynamiką robotów,
 - sterowaniem robotów,
 - architekturą komputerowych układów sterowania,
 - językami programowania,
 - lokomocją,
 - wizją,
 - sensoryką,
 - sztuczną inteligencją.

3

Wprowadzenie do robotyki

Pojęcia podstawowe

- **Robotem** nazywa się urządzenie techniczne przeznaczone do realizacji funkcji manipulacyjnych i lokomocyjnych (na podobieństwo człowieka), mające określony zasób energii, informacji i charakteryzujące się całkowitą lub częściową autonomią w działaniu.
- **Manipulator** (ramię manipulacyjne) jest to urządzenie przeznaczone do realizacji niektórych funkcji kończyny górnej człowieka. Rozróżnia się tutaj dwie funkcje: manipulacyjną i wyciągającą.
- **Robot przemysłowy** to wielofunkcyjny manipulator przeznaczony do przenoszenia materiałów, części lub wyspecjalizowanych urządzeń poprzez złożone programowane ruchy, w celu realizacji różnorodnych zadań.

4

Wprowadzenie do robotyki

- **Robot mobilny** jest urządzeniem przeznaczonym do realizacji funkcji lokomocyjnych. Roboty mobilne najczęściej wyposażane są w koła lub gąsienice. W klasie robotów mobilnych mieszczą się również roboty kroczące, latające i pływające.
- **Robot kroczący** to urządzenie przeznaczone do realizacji funkcji lokomocyjnych zwierząt i owadów mających kończyny lub odnóża. Lokomocja takiej maszyny ma najczęściej charakter dyskretny i może być realizowana przy użyciu jednej, dwóch, trzech, czterech, sześciu, ośmiu lub więcej „nóg” jako chód, bieg, skok po podłożu.
- **Pedipulatorem** nazywa się „nogę” robota krocącego, która może być układem jedno-, dwu- lub trójczłonowym.

5



ASIMO (Honda)



Roboty przemysłowe KUKA



BigDog
(Boston Dynamics)



MiniTracker3



Inspektor (PIAP)

6

Robot medyczny da Vinci



Roboty usługowe



Latające



Pływające

7

Wprowadzenie do robotyki

Robot oddziałuje na otoczenie w celu realizacji postawionego (przez człowieka) zadania, które zawsze rozumiane jest jako zmiana stanu otoczenia. Z tego powodu w schemacie działania robota wyróżnia się sześć elementów:

1. **Układ mechaniczny** złożony przede wszystkim z łańcucha(ów) kinematycznego służącego do realizacji czynności manipulacyjnych lub lokomocyjnych.
2. **Siłowniki** (elementy wykonawcze, napędy) przeznaczone do poruszania częścią mechaniczną robota.
3. **Układ sterowania** robota, którego zadaniem jest wykonywanie obliczeń związanych m.in. z generowaniem sygnałów sterujących.

Wprowadzenie do robotyki

4. **Układ sensoryczny** robota potrzebny do zamknięcia sprzężenia zwrotnego dla celów sterowania oraz funkcji inspekcji otoczenia.
5. **Otoczenie** robota tj. przestrzeń, w której znajduje się i działa robot.
6. **Zadanie** rozumiane jako różnica dwóch stanów otoczenia – początkowego i końcowego (pożądanego). Zadanie opisane jest w odpowiednim języku (najlepiej naturalnym) i realizowane przez komputer sterujący.

Pierwsze cztery elementy są częściami składowymi każdego rodzaju robota

9

Robot przemysłowy

Zgodnie z podaną definicją **robot przemysłowy** stosowany jest głównie w zakładach produkcyjnych do zadań transportu materiałów i produktów, zadań manipulacyjnych oraz kontrolnych i pomiarowych.

Zadania transportu materiałów i produktów:

- paletyzacja (dedykowane manipulatory o 5 stopniach swobody),
- składowanie materiałów w magazynach,
- sortowanie części,
- pakowanie.

10

Robot przemysłowy

Aplikacje na taśmie produkcyjnej:

- spawanie i zgrzewanie,
- malowanie,
- klejenie,
- cięcie, np. laserem, wodą,
- wiercenie i skręcanie,
- składanie części mechanicznych i elektrycznych,
- montaż układów i płytek elektronicznych.

Jako urządzenie pomiarowe:

- inspekcja części i produktów (aplikacje z systemami wizyjnymi),
- badanie konturów elementów,
- pomiar niedokładności wytwarzania.

11

Robot przemysłowy

Struktury kinematyczne manipulatorów przemysłowych

Łańcuch kinematyczny manipulatora składa się z **ogniw** (członów) i ruchomych połączeń między ogniwami, które nazywa się **złączami** (przegubami). Najczęściej ogniwem jest bryła sztywna (spotyka się też ogniwa elastyczne).

Najważniejsze rodzaje połączeń ruchomych (nazwa, ruchy względne, liczba stopni swobody - DoF):

- Obrotowe oznaczane literą R (lub O) – 1 obrót, 0 postępów, 1 DoF,
- Postępowe oznaczane literą P – 0 obrotów, 1 postęp, 1 DoF,
- Śrubowe – 1 obrót, 1 postęp, 1 DoF,
- Postępowo-obrotowe – 2 obroty, 2 postępy, 2 DoF

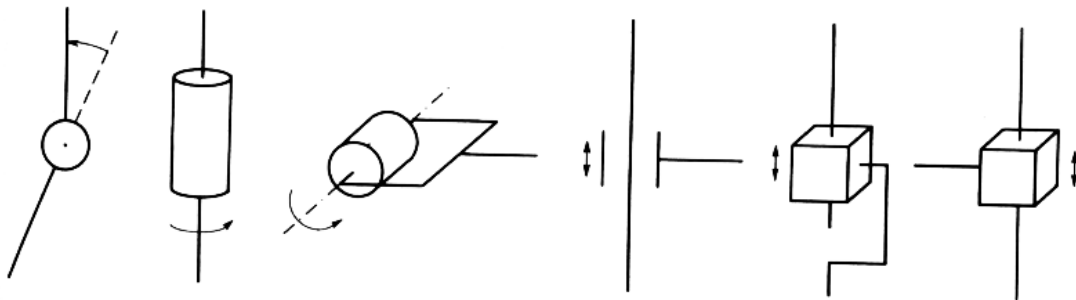
12

Robot przemysłowy

Struktury kinematyczne manipulatorów przemysłowych

Do opisu ruchu manipulatorów wykorzystuje się tylko dwa rodzaje połączeń, obrotowe i postępowe, gdyż każde inne połączenie może być opisane za ich pomocą.

Graficzna reprezentacja przegubów typu R (obrót) i P (przesuw) stosowana w diagramach (schematach kinematycznych):

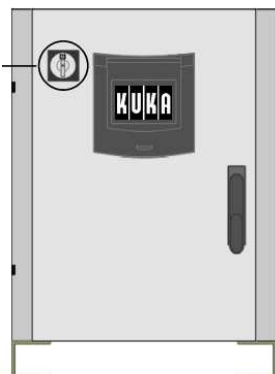


13

Robot przemysłowy

Elementy systemu robota przemysłowego:

- szafa sterownika robota (układ zasilania, komputerowy system sterujący, sterowniki napędów i wzmacniacze mocy, układy wejść-wyjść binarnych i analogowych, moduły komunikacyjne),
- ramię manipulacyjne (typowo sześć stopni swobody – 6 DoF),
- pulpit (terminal) operatora-programisty.



14

Robot przemysłowy

Podstawowe parametry użytkowe manipulatorów przemysłowych:

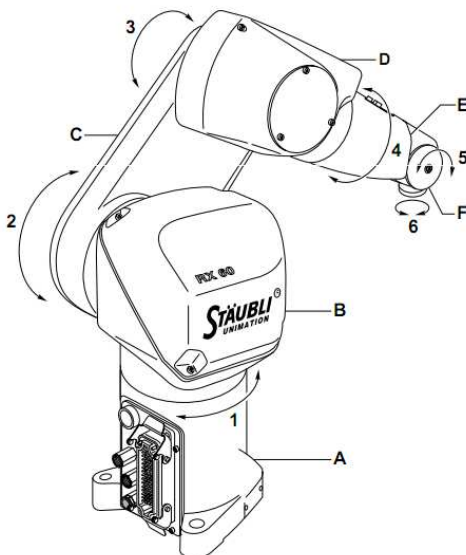
- masa własna,
- udźwig nominalny i maksymalny,
- maksymalne prędkości: liniowa końcówki i kątowe (liniowe) w złączach,
- powtarzalność osiągnięcia nauczonych punktów w przestrzeni kartezjańskiej oraz w przestrzeni złączy,
- dokładność osiągnięcia zadanych punktów,
- wielkość (objętość) i rodzaj przestrzeni roboczej.

15

Robot przemysłowy

Manipulacja ramieniem robota, układy współrzędnych

- Ruch we współrzędnych konfiguracyjnych (uogólnionych) wykonywany w poszczególnych złączach manipulatora.



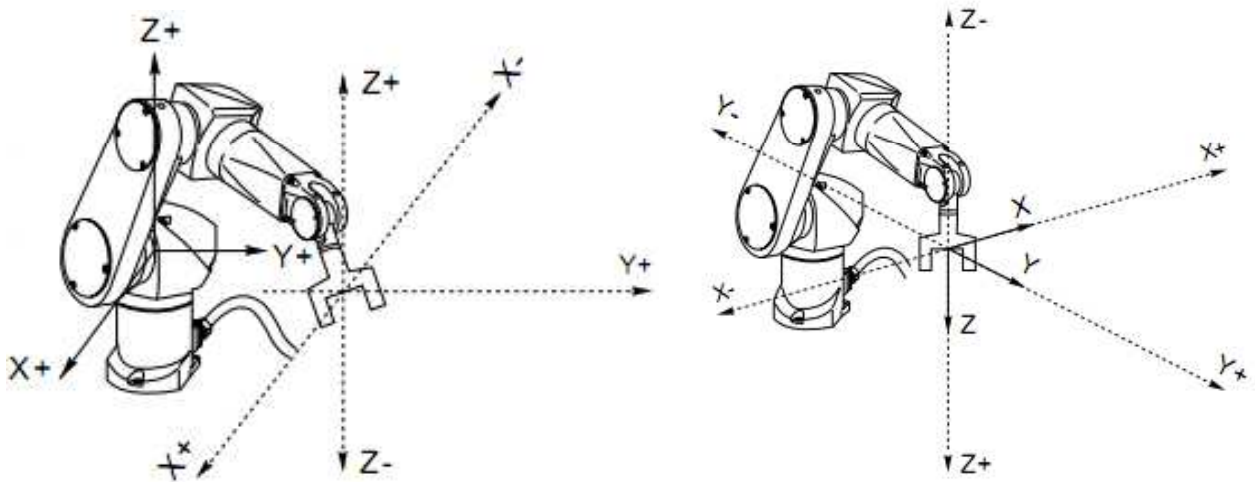
Manipulator typu SCARA

16

Robot przemysłowy

Manipulacja ramieniem robota, układy współrzędnych

- Ruch w układach współrzędnych kartezjańskich (globalnym oraz narzędzia), zmiana położenia i orientacji



17

Kinematyka manipulatora przemysłowego

Reprezentacja lokalizacji (pozycji i orientacji) końcówki manipulatora w układzie podstawowym (odniesienia)

- Reprezentacja w postaci wektora współrzędnych konfiguracyjnych

$$\mathbf{q} = [q_1 \ \dots \ q_6]^T \in \mathbb{R}^6$$

- Reprezentacja w postaci wektora opisującego położenie początku układu końcówki oraz macierzy rotacji określającej orientację układu końcówki względem ustalonego układu odniesienia.

$$\mathbf{p}_6^B \triangleq [p_{6x}^B \ p_{6y}^B \ p_{6z}^B]^T \quad \mathbf{R}_6^B \triangleq [\mathbf{n}_6^B \ \mathbf{o}_6^B \ \mathbf{a}_6^B]$$

Macierz transformacji jednorodnej:

$$\mathbf{T}_A^B \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}_A^B & \mathbf{p}_A^B \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$$

18

Kinematyka manipulatora przemysłowego

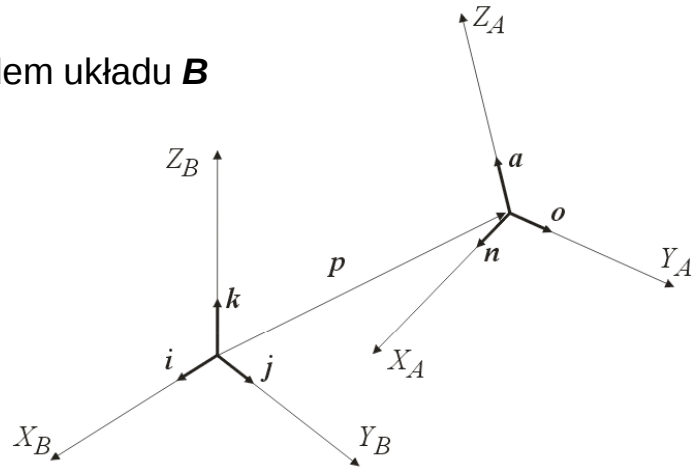
Macierz rotacji

- Orientacja osi układu **A** względem układu **B**

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k},$$

$$\mathbf{o} = o_x \mathbf{i} + o_y \mathbf{j} + o_z \mathbf{k},$$

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k},$$



$$\mathbf{R}_A^B = [\mathbf{n} \quad \mathbf{o} \quad \mathbf{a}] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}^T \mathbf{i} & \mathbf{o}^T \mathbf{i} & \mathbf{a}^T \mathbf{i} \\ \mathbf{n}^T \mathbf{j} & \mathbf{o}^T \mathbf{j} & \mathbf{a}^T \mathbf{j} \\ \mathbf{n}^T \mathbf{k} & \mathbf{o}^T \mathbf{k} & \mathbf{a}^T \mathbf{k} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

19

Kinematyka manipulatora przemysłowego

Kąty Eulera

- Macierz rotacji jest nadmiarową reprezentacją orientacji w przestrzeni 3D.
- Minimalna reprezentacja składa się z trzech parametrów zwanych kątami Eulera odpowiadających złożeniu trzech elementarnych obrotów układu **A** względem wybranych osi w przestrzeni. Opis taki jest jednak niejednoznaczny. Istnieje dwanaście różnych zbiorów kątów Eulera odpowiadających możliwym sekwencjom rotacji elementarnych wokół osi układu bieżącego oraz dwanaście wokół osi układu ustalonego.
- W robotyce najczęściej stosowane są dwie konwencje kątów Eulera.

20

Kinematyka manipulatora przemysłowego

Kąty XYZ

- Kąty XYZ (zwane kątami RPY z ang. Roll-Pitch-Yaw – kołysanie boczne, kołysanie wzdłużne, zbaczanie). Wyjściowa macierz rotacji wynika ze złożenia następującej sekwencji obrotów wokół osi **ustalonego układu odniesienia**: obrót o kąt ψ wokół osi X_B , obrót o kąt ϑ wokół osi Y_B i obrót o kąt φ wokół osi Z_B .

$$\begin{aligned}
 R_A^B &\stackrel{\text{RPY}}{=} R_{AZ_B}(\varphi) R_{AY_B}(\vartheta) R_{AX_B}(\psi) = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & 0 & \sin \vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \vartheta & \cos \varphi \sin \vartheta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \vartheta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \\ \sin \varphi \cos \vartheta & \sin \varphi \sin \vartheta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \sin \vartheta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \sin \psi & \cos \vartheta \cos \psi \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

21

Kinematyka manipulatora przemysłowego

Kąty ZYZ

- Kąty ZYZ (zwane kątami precesji, nutacji i obrotu własnego). Wyjściowa macierz rotacji wynika ze złożenia następującej sekwencji obrotów realizowanych wokół osi **bieżącego układu odniesienia**: obrót o kąt φ wokół osi Z_A ; obrót o kąt ϑ wokół osi $Y_{A'}$ i obrót o kąt ψ wokół osi $Z_{A''}$

$$\begin{aligned}
 R_A^B &\stackrel{\text{ZYZ}}{=} R_{AZ_A}(\varphi) R_{AY_{A'}}(\vartheta) R_{AZ_{A''}}(\psi) = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & 0 & \sin \vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \vartheta \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi & -\cos \varphi \cos \vartheta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \vartheta \\ \sin \varphi \cos \vartheta \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi & -\sin \varphi \cos \vartheta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta \sin \psi & \cos \vartheta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

22

Kinematyka manipulatora przemysłowego

Opis ruchu manipulatora – kinematyka manipulatora

- **Kinematyka** zajmuje się analizą ruchu (położeniem, prędkością i przyspieszeniem) bez uwzględniania sił wywołujących ten ruch.
- Kinematyka pozycji i orientacji (**kinematyka położenia**) wynika jedynie z geometrycznych (statycznych) własności manipulatora – tzw. parametrów kinematycznych.

Dwa zadania związane z kinematyką położenia dla manipulatora:

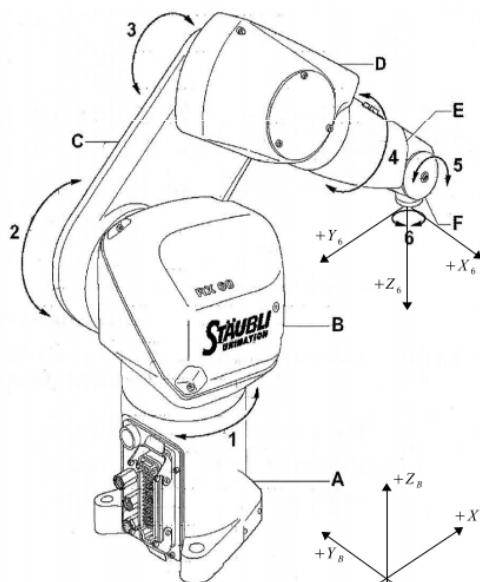
- zadanie **proste** kinematyki położenia,
- zadanie **odwrotne** kinematyki położenia.

23

Kinematyka manipulatora przemysłowego

- Zadanie **proste** kinematyki – polega na określeniu pozycji i orientacji układu współrzędnych końcówki roboczej względem układu podstawowego na podstawie zadanych wartości współrzędnych konfiguracyjnych manipulatora. Rozwiązanie zadania kinematyki prostej daje zawsze **jednoznaczne rozwiązanie**.

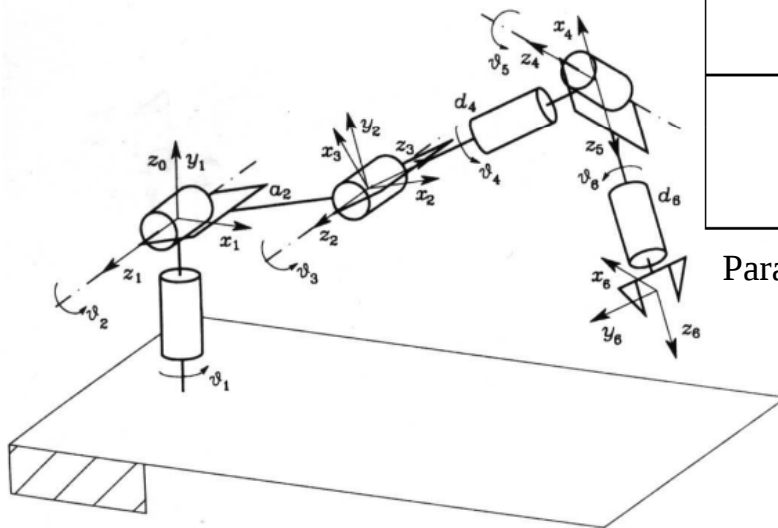
$$q \mapsto T_6^0$$



24

Kinematyka manipulatora przemysłowego

- Zadanie proste kinematyki dla manipulatora antropomorficznego z nadgarstkiem sferycznym



Nr ogniwa	α_i	a_i	d_i	θ_i	σ_i	$\bar{\sigma}_i$
1	$\pi/2$	0	0	ϑ_1	0	1
2	0	a_2	0	ϑ_2	0	1
3	$\pi/2$	0	0	ϑ_3	0	1
4	$-\pi/2$	0	d_4	ϑ_4	0	1
5	$\pi/2$	0	0	ϑ_5	0	1
6	0	0	d_6	ϑ_6	0	1

Parametry Denavita i Hartenberga (D-H)

25

Kinematyka manipulatora przemysłowego

- Macierz transformacji jednorodnej

$$T_i^j(q_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Wypadkowa macierz przekształcenia jednorodnego reprezentująca położenie końcówki w układzie zerowym (podstawowym) dla manipulatora 6-DoF

$$T_6^0(q) = T_1^0(q_1) T_2^1(q_2) \dots T_i^j(q_i) \dots T_6^5(q_6)$$

26

Kinematyka manipulatora przemysłowego

- Zadanie **odwrotne** kinematyki – polega na określeniu zestawu wartości współrzędnych konfiguracyjnych na podstawie zadanej pozycji i orientacji układu współrzędnych końcówki roboczej względem układu podstawowego.

$$T_6^0 \mapsto q$$

Zadanie odwrotne kinematyki może mieć kilka rozwiązań w przestrzeni zmiennych konfiguracyjnych (np. cztery).

Może zdarzyć się także sytuacja w której rozwiązań będzie nieskończenie wiele, bądź rozwiązanie nie będzie istnieć w zbiorze liczb rzeczywistych. Takie sytuacje mają miejsce w tzw. **punktach osobliwych** odwzorowania kinematyki.

Realizacja ruchu w układzie kartezjańskim wymaga rozwiązania zadania odwrotnego kinematyki!

27

Kinematyka manipulatora przemysłowego

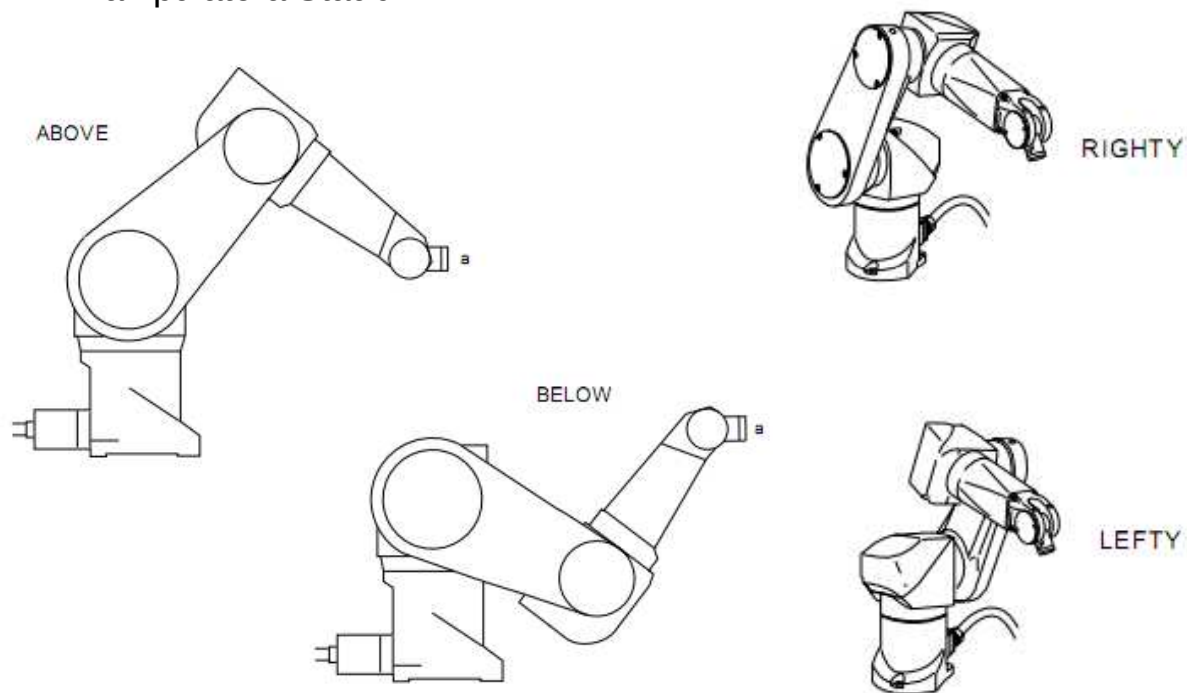
Metody rozwiązywanie zadania odwrotnego kinematyki

- Rozwiązania w postaci jawnej:
 - metoda geometryczna,
 - metody algebraiczne (przez podstawianie, przez redukcję do wielomianu).
- Rozwiązania numeryczne:
 - z wykorzystaniem jakobianu,
 - algorytmy iteracyjnego rozwiązywania zadania odwrotnego:
 - metoda największego spadku,
 - metoda Newtona-Raphsona,
 - metoda wykorzystująca kwaterniony.

28

Kinematyka manipulatora przemysłowego

- Cztery możliwe rozwiązania zadania kinematyki odwrotnej dla manipulatora Stäubli



29

Podstawy programowania robotów

Podstawowa metoda programowania robotów przemysłowych to metoda **Teach and Repeat**. Polega na ręcznym ustawieniu końcówki ramienia manipulatora w żądanych lokalizacjach i ich zapamiętaniu w systemie sterownika. Sekwencyjne odtwarzanie kolejnych lokalizacji daje program ruchowy manipulatora.

Reprezentacje punktów lokalizacji w systemach robotów przemysłowych 6-DoF:

- w przestrzeni konfiguracyjnej w postaci wektora sześciu liczb $q_1 \dots q_6$ reprezentujących wartości poszczególnych kątów/przesunięć w przegubach manipulatora
- reprezentacja w przestrzeni kartezjańskiej złożona z sześciu liczb $X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma$ reprezentujących pozycję (X, Y, Z) i orientację (trzy kąty Eulera α, β, γ) układu końcówki manipulatora względem układu globalnego (odniesienia).

30

Podstawy programowania robotów

Realizacja ruchu końcówki roboczej manipulatora

Automatyczny ruch między nauczonymi punktami w przestrzeni roboczej realizowany jest za pomocą komend ruchu. Rodzaj ruchu między dwoma punktami wynika z przyjętej strategii zwanej interpolacją trajektorii. Podstawowe rodzaje interpolacji ruchu końcówki w przestrzeni zadania:

- Ruch od punktu do punktu (Point to Point) – końcówka jest prowadzona wzdłuż najszybszej ścieżki łączącej oba punkty,
- Ruch liniowy – końcówka jest prowadzona wzdłuż prostej łączącej oba punkty w przestrzeni zadania,
- Interpolacja typu kołowego - końcówka jest prowadzona wzdłuż łuku okręgu łączącego oba punkty w przestrzeni zadania.

31

Podstawy programowania robotów

Planowanie realizacji zadania

Planowanie zadania wymaga określenia punktów w przestrzeni zadania umożliwiających:

- Szybkie i bezkolizyjne przejście pomiędzy elementami otoczenia (ruchy z interpolacją PTP),
- Prawidłowe pobranie, manipulację i odkładanie elementów (ruchy z interpolacją liniową),
- Odtworzenie żądanej ścieżki narzędzia w przestrzeni zadania (kombinacje ruchów z interpolacją PTP, liniową i kołową, ruchy typu SPL, wykorzystanie pakietów technologicznych).
- Ponadto należy uwzględnić prawidłową interakcję sterownika robota z otoczeniem (obsługa wejść/wyjść, komunikacja z PLC, itp.).

32

Podstawy programowania robotów

Etapy przygotowania i testowania programu

- Zebranie punktów w przestrzeni roboczej niezbędnych do realizacji zadania,
- Przygotowanie programu sterującego z odpowiednimi ruchami pomiędzy punktami (wybór rodzaju interpolacji ruchu) i interakcją z otoczeniem,
- Testowanie programu w pracy krokowej z ograniczoną prędkością, następnie powtórzenie testu w pracy ciągłej (powtórzyć zwiększając prędkości do wartości maksymalnych w trybie testowym),
- Uruchomienie programu w trybie automatycznym ze zredukowaną prędkością ruchu a następnie powtórzenie z maksymalną.

33

Podstawy programowania robotów

Planowanie chwytu przenoszonego ładunku do transportu

- Wprowadzenie lokalizacji L związanej z ładunkiem,
- Podjazd końcówki robota z pozycji początkowej P do punktu A położonego o odległość *distance* od lokalizacji L licząc wzdłuż osi Z narzędzia robota,
- Otwarcie szczęk chwytaka,
- Dojazd po linii prostej chwytakiem do lokalizacji L związanej z ładunkiem,
- Zamknięcie szczęk chwytaka i uchwycenie ładunku,
- Odjazd z ładunkiem po linii prostej od lokalizacji L do punktu bezpiecznie oddalonego od miejsca uchwycenie ładunku,
- Transport ładunku do lokalizacji docelowej.

34

Podstawy programowania robotów

Planowanie chwytu przenoszonego ładunku do transportu

APPRO L, distance
OPENI
MOVES L
CLOSEI
DEPARTS distance

