

# Opracowanie Robotyka

Jan Bronicki, Mateusz Górka

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wykład 1</b>	<b>3</b>
1.1	Warunki, aby macierz była macierzą obrotu . . . . .	3
1.2	Jak sprawdzić prawoskrętność? . . . . .	3
1.3	Obroty stanowią grupę . . . . .	3
1.4	Macierze obrotów ZXY . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Wykład 2</b>	<b>4</b>
2.1	Współrzędne jednorodne, rozszerzenie do 4 wymiarów . . . . .	4
2.2	Dzięki współrzędnym jednorodnym operacja rotacji i translacji jest reprezentowana przez jedną macierz	7
2.3	Składanie ruchów . . . . .	7
2.4	Parametryzacja obrotów . . . . .	8
2.4.1	Reprezentacja obrotów: Kąty Eulera . . . . .	8
2.4.2	Reprezentacja obrotów: Roll-Pitch-Yaw . . . . .	9
2.4.3	Reprezentacja typu oś-kąt, dla macierzy $\mathbf{R}$ , k-oś (musi być znormalizowana, czyli $\ k\  = 1$ ) . . . . .	9
2.4.4	Obrót układ w okół dowolnego wektora (tutaj $v$ ) o kąt $\theta$ . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Wykład 3</b>	<b>11</b>
3.1	Transformacje prędkości . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Wykład 4</b>	<b>14</b>
4.1	Kinematyka i algorytm Denavita-Hartenberga . . . . .	14
4.2	Algorytm Denavita-Hartenberga . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Kinematyka</b>	<b>16</b>
5.1	Macierz kinematyki . . . . .	16
5.2	Jakobian analityczny . . . . .	17
5.2.1	Zasada Pracy Wirtualnej . . . . .	17
5.2.2	Konfiguracje osobliwe i regularne . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Jakobian geometryczny</b>	<b>17</b>
6.1	Jakobian geometryczny w przestrzeni . . . . .	17
6.2	Jakobian geometryczny w ciele . . . . .	17
6.3	Jakobian manipulatora . . . . .	18
6.4	Miary zręczności manipulator . . . . .	19
<b>7</b>	<b>Dynamika sztywnego manipulatora</b>	<b>20</b>
7.0.1	Macierz pseudoinercji . . . . .	20
7.0.2	Energia kinetyczna . . . . .	20
7.0.3	Energia potencjalna . . . . .	20
7.0.4	Lagranżjan dla całego układu . . . . .	20
<b>8</b>	<b>Kinematyka robota mobilnego</b>	<b>21</b>

<b>9</b>	<b>Przydatne wzorki</b>	<b>21</b>
9.1	Trygonometria . . . . .	21

# 1 Wykład 1

## 1.1 Warunki, aby macierz była macierzą obrotu

Aby macierz obrotu  $\mathbf{R}$  była macierzą obrotu musi spełniać warunki:

- $R^T R = I_3$  - macierz musi być ortogonalna
- $\det R = +1$  - macierz musi być *prawoskrętna*
- $T$  - (Translacja) - może być dowolna

## 1.2 Jak sprawdzić prawoskrętność?

Dla:

- $i$  - wersor osi  $\mathbf{X}$
- $j$  - wersor osi  $\mathbf{Y}$
- $k$  - wersor osi  $\mathbf{Z}$

Warunki prawoskrętności:

$$\begin{cases} j \times i = k \\ j \times k = i \\ k \times i = j \end{cases}$$

$T$  - (Translacja, czyli przesunięcie) - dowolna.

## 1.3 Obroty stanowią grupę

Obroty stanowią grupę, która jest zbiorem działań, w którym jest zdefiniowany element odwrotny i neutralny:

- Element neutralny -  $I_3$
- Element odwrotny -  $R^T$

## 1.4 Macierze obrotów ZXY

$$rot(z, \alpha) = \begin{bmatrix} c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$rot(x, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\beta & -s_\beta \\ 0 & s_\beta & c_\beta \end{bmatrix}$$

$$rot(y, \gamma) = \begin{bmatrix} c_\gamma & 0 & s_\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\gamma & 0 & c_\gamma \end{bmatrix}$$

## 2 Wykład 2

### 2.1 Współrzędne jednorodne, rozszerzenie do 4 wymiarów

$$p_0 = R_0^1 \cdot p_1$$

$$p_0 = R_0^1 p_1, \quad R_0^1 = \begin{bmatrix} i_1 i_0 & j_1 i_0 & k_1 i_0 \\ i_1 j_0 & j_1 j_0 & k_1 j_0 \\ i_1 k_0 & j_1 k_0 & k_1 k_0 \end{bmatrix}$$

- $p_0$  - położenie wektora w układzie "0"
- $p_1$  - położenie wektora w układzie "1"
- $R_0^1$  - macierz obrotu z położenia "0" do "1"

Uwzględniając Translacje:

$$p_0 = R_0^1 \cdot p_1 + T_0^1$$

$T_0^1$  - to inaczej odległość pomiędzy początkami układów współrzędnych

Dodajemy czwarty wymiar, aby łatwiej manipulować:

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c} R_{0_{3x3}}^1 & T_{0_{3x1}}^1 \\ \hline 0_{1x3} & 1 \end{array} \right] \begin{pmatrix} p_1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Przykłady, na macierzach jednorodnych (gdzie  $T = [0, 0, 0]^T$ ):

$$Rot(x, \alpha) = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ 0 & s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$Rot(y, \beta) = \left[ \begin{array}{ccc|c} c_\gamma & 0 & s_\gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_\gamma & 0 & c_\gamma & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$Rot(z, \gamma) = \left[ \begin{array}{ccc|c} c_\alpha & -s_\alpha & 0 & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Przykłady Translacji po danych osiach (bez rotacji):

$$Trans(x, a) = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$Trans(y, b) = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$Trans(z, c) = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Inna interpolacja:

Gdy  $T_0^1 = 0$  układy nie są przesunięte względem siebie, ale są skręcone: np (gdzie 1, to i-te miejsce):

$$p_1 = e_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c} R_{0_{3 \times 3}}^1 & 0 \\ \hline 0_{1 \times 3} & 1 \end{array} \right] \begin{pmatrix} e_1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## 2.2 Dzięki współrzędnym jednorodnym operacja rotacji i translacji jest reprezentowana przez jedną macierz

Ważne:

- Rotacje następujące po sobie są mnożeniem następujących macierzy obrotu
- Współrzędne jednorodne są grupą nieprzemianną, z działaniem "mnożenie macierzy"

$$K = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \implies K^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T \cdot T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 2.3 Składanie ruchów

1. Względem osi bieżących (np. nasz statek, którym sterujemy)

Mnożymy od lewej do prawej:

$$K_0^n = K_0^1 \cdot K_1^2 \cdot K_2^3 \cdot \dots \cdot K_{n-1}^n$$

Nie jest ważne przez jakie macierze przechodziliśmy, ważne jest jak skończyliśmy.

Przykład mnożenie:

$$K_0^1 = \begin{bmatrix} R_0^1 & T_0^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad K_1^2 = \begin{bmatrix} R_1^2 & T_1^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_0^1 \cdot K_1^2 = K_0^2 = \begin{bmatrix} R_0^1 & T_0^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1^2 & T_1^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c} \overbrace{R_0^1 \cdot R_1^2}^{R_0^2} & \overbrace{R_0^1 T_1^2 + T_0^1}^{T_0^2} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right]$$

2. Względem osi ustalonych (np. wybrzeża portu)

Od prawej do lewej (jest mniej ważne)

## 2.4 Parametryzacja obrotów

$$R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n = R_w$$

$R_w$  - wynik mnożenia macierzy obrotów, także jest obrotem

### 2.4.1 Reprezentacja obrotów: Kąty Eulera

Kąty Eulera (w formie ZYZ):

$$E(\alpha, \beta, \gamma) = \text{rot}(z, \alpha) \cdot \text{rot}(y, \beta) \cdot \text{rot}(z, \gamma)$$

Macierz ogólna takiej rotacji:

$$\begin{aligned} E(\alpha, \beta, \gamma) &= \text{rot}(z, \alpha) \cdot \text{rot}(y, \beta) \cdot \text{rot}(z, \gamma) = \\ &= \begin{bmatrix} c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_\beta & 0 & s_\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\beta & 0 & c_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_\gamma & -s_\gamma & 0 \\ s_\gamma & c_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \left[ \begin{array}{c|c|c} c_\alpha c_\beta c_\gamma - s_\alpha s_\gamma & -c_\alpha c_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\alpha & c_\alpha s_\beta \\ \hline s_\alpha c_\beta c_\gamma + c_\alpha s_\gamma & -s_\alpha c_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta \\ \hline -s_\beta c_\gamma & s_\beta s_\gamma & c_\beta \end{array} \right] \end{aligned}$$

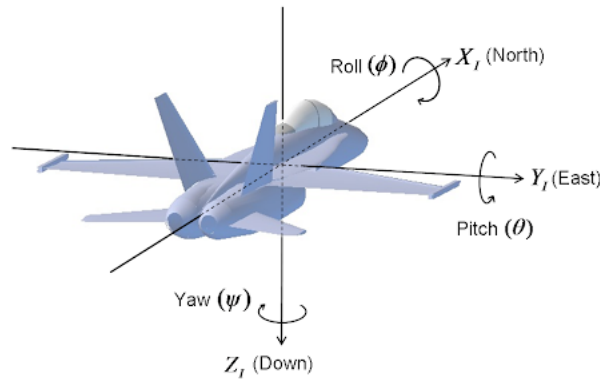


### 2.4.2 Reprezentacja obrotów: Roll-Pitch-Jaw

Jest to reprezentacja typu oś-kąt

$$RPY(\phi, \theta, \psi) = \text{rot}(z, \psi) \cdot \text{rot}(y, \theta) \cdot \text{rot}(x, \phi)$$

$$RPY(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & -s_\phi c_\theta + c_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi \\ s_\phi c_\theta & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix}$$



<https://youtu.be/pQ24NtnaL18>

### 2.4.3 Reprezentacja typu oś-kąt, dla macierzy $\mathbf{R}$ , k-oś (musi być znormalizowana, czyli $\|k\| = 1$ )

Jak znaleźć oś z macierzy obrotu?

$\text{tr } R$  - Ślad macierzy  $\mathbf{R}$

Suma elementów na przekątnej w macierzy  $\mathbf{R}$ :

$$\text{tr } R = 1 + 2 \cdot c_\theta \implies \theta = \arccos\left(\frac{\text{tr } R - 1}{2}\right)$$

Obrót w okół osi  $\mathbf{k}$  o kąt  $\theta$ :

$$[k] = \frac{R - R^T}{2 \cdot \sin \theta} = \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix} \implies k = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix}$$

Operacja odwrotna. Mamy jakiś wektor  $\mathbf{k}$  i chcemy go unormować, żeby miał długość 1 i mamy podany kąt o jaki chcielibyśmy wykonać obrót:

Zwykły wektor  $k_{zw}$ , który chcemy unormować do postaci  $k = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix}$ , gdzie  $\|k\| = 1$

Jakiej macierzy odpowiada obrót wokół wektora  $\mathbf{k}$  o kąt  $\theta$ ?

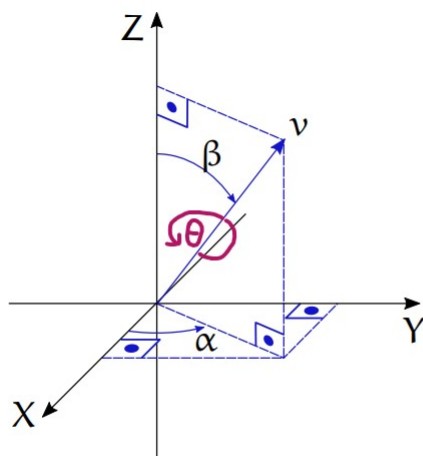
$$rot(k, \theta) = I_3 + [-k] \sin \theta + (1 - \cos \theta) [k]^2$$

$$rot(k, \theta) = \begin{bmatrix} k_x^2(1 - c_\theta) + c_\theta & k_x k_y(1 - c_\theta) - k_z s_\theta & k_x k_z(1 - c_\theta) - k_y s_\theta \\ k_x k_y(1 - c_\theta) + k_z s_\theta & k_y^2(1 - c_\theta) + c_\theta & k_y k_z(1 - c_\theta) - k_x s_\theta \\ k_x k_z(1 - c_\theta) - k_y s_\theta & k_y k_z(1 - c_\theta) + k_x s_\theta & k_z^2(1 - c_\theta) + c_\theta \end{bmatrix}$$

#### 2.4.4 Obrót układ w okół dowolnego wektora (tutaj $v$ ) o kąt $\theta$

Robimy to tak jakbyśmy byli we współrzędnych sferycznych. Na początku jest to rotacja w okół  $Z$  o kąt  $\alpha$

$$R(v, \varphi) = R(Z, \alpha) R(Y, \beta) R(Z, \varphi) R^T(Y, \beta) R^T(Z, \alpha)$$



Rysunek 2.4: Kierunek osi obrotu  $v$

Ogólną macierz transformacji o dowolny (unormowany) wektor można policzyć na wiele sposobów. Jest to transformacja odwrotna do transformacji **oś-kąt**

### 3 Wykład 3

#### 3.1 Transformacje prędkości

Zakładamy, że ruch polega wyłącznie na zmianie orientacji ciała (brak translacji), czyli:

$$c(t) = \begin{bmatrix} R(t) & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \cong R(t)$$

Ponieważ  $R(t)$  jest macierzą **ortogonalną**, w każdej chwili zachodzi:

$$R(t)R^T(t) = R^T(t)R(t) = I_3$$

skąd wynika:

$$\dot{R}(t)R^T(t) + R(t)\dot{R}^T(t) = \dot{R}^T(t)R(t) + R^T(t)\dot{R}(t) = 0$$

Otrzymujemy dwa pojęcia prędkości kątowej ciała sztywnego zdefiniowane macierzami:

1.  $\Omega_S = \dot{R}R^T$  - prędkość w **przestrzeni** (**S** od **Space**)
2.  $\Omega_B = R^T\dot{R}$  - prędkość w **ciele** (definiowanie względem czegoś ruchomego) (**B** od **Body**)

Zachodzi:

$$\dot{R} = \Omega_S R = R \Omega_B \rightarrow \Omega_S = R \Omega_B R^T$$

Obie macierze prędkości kątowej spełniają warunek:

$$\Omega + \Omega^T = 0$$

Macierz antysymetryczna/skośnie symetryczna:

$$\Omega = -\Omega^T$$

Macierze  $\Omega_S$  i  $\Omega_B$  są skośnie symetryczne. Każda macierz skośnie symetryczna  $3 \times 3$  jest zdefiniowana przez trzy parametry  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ :

$$\Omega = [\omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Rozmieszczenie składowych wektora  $\omega$  w macierzy  $[\omega]$  jest takie żeby (gdzie  $v$  to wektor w 3D):

$$\Omega v = \omega \times v$$

Stosując to rozumowania możemy zdefiniować:

- $\Omega_S = [\omega_S]$  - wektor prędkości kątowych względem układu nieruchomego w przestrzeni
- $\Omega_B = [\omega_B]$  - wektor prędkości kątowych względem układu ciała

Ponieważ obrót był pierwotnie opisany w macierzy  $4 \times 4$  tak też robimy:

$$\begin{bmatrix} \Omega & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix}$$

gdzie  $\Omega$  to byle które z prędkości.

Rozważmy teraz przykład ogólny ruchu zawierającego zarówno przesunięcie (translacje), jak i obrót:

$$c(t) = \begin{bmatrix} R(t) & T(t) \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

Zróżniczkowane po czasie:

$$\dot{c}(t) = \begin{bmatrix} \dot{R}(t) & \dot{T}(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Macierz przedstawiająca prędkości względem przestrzeni

$$V_S = \dot{c}c^{-1}$$

Macierz przedstawiająca prędkości względem ciała

$$V_B = c^{-1}\dot{c}$$

Na mocy powyższych definicji otrzymujemy:

$$V_S = \begin{bmatrix} \dot{R} & \dot{T} \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^T & -R^T T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

tzn.

$$V_S = \begin{bmatrix} \Omega_S & \dot{T} - \Omega_S T \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \cong v_S = \begin{pmatrix} \dot{T} - \omega_S \times T \\ \omega_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{T} + [T] \omega_S \\ \omega_S \end{pmatrix}$$

Wektor  $v_S \in \mathbb{R}^6$  reprezentujący macierz  $V_S$  nazywany **skrętnikiem w przestrzeni**. W podobny sposób wyznaczamy  $V_B$ :

$$V_B = \begin{bmatrix} R^T \dot{R} & R^T \dot{T} \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \cong v_B = \begin{pmatrix} R^T \dot{T} \\ \omega_B \end{pmatrix}$$

Korzystając z własności prędkości kątowych w przestrzeni i w ciele oraz z izomorfizmu [ ] otrzymujemy następujący związek między skrętnikami:

$$v_S = \begin{bmatrix} R & [T] R \\ 0^T & R \end{bmatrix} v_B$$

Interpretacja macierzowych prędkości  $V_S$  i  $V_B$ . Niech będzie dany punkt P w układzie ciała, o współrzędnych  $p \in \mathbb{R}$ . Jego współrzędne układu przestrzeni:

$$s = Rp + T$$

Obliczamy prędkość  $\dot{s} = \dot{R}p + \dot{T}$ , co po podstawieniu  $p = R^T(s - T)$  prowadzi do wzoru:

$$\dot{s} = \dot{R}R^T(s - T) + \dot{T} = \omega_S \times (s - T) + \dot{T}$$

Ostatnią zależność można zapisać jako:

$$\begin{pmatrix} \dot{s} \\ 0 \end{pmatrix} = V_S \begin{pmatrix} s \\ 1 \end{pmatrix}$$

Wynika stąd, że macierzowa prędkość  $V_S$  określa prędkość ruchu punktu P o współrzędnych jednorodnych  $(p^T, 1)^T$ , względem układu przestrzeni. Prowadź to do wniosku:

$$\begin{pmatrix} R^T \dot{s} \\ 0 \end{pmatrix} = V_B \begin{pmatrix} p \\ 1 \end{pmatrix}$$

## 4 Wykład 4

### 4.1 Kinematyka i algorytm Denavita-Hartenberga

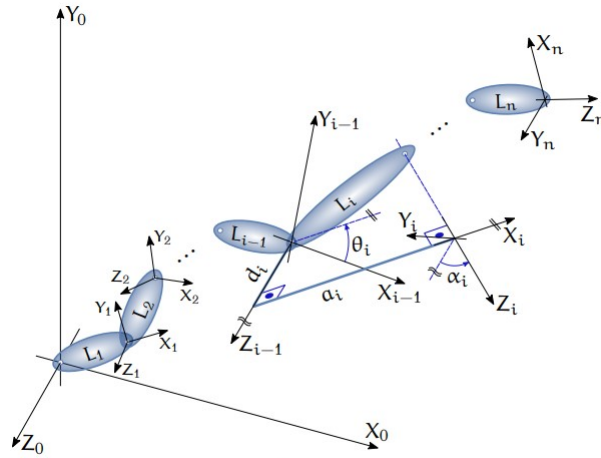
Liczenie kinematyki manipulatora.

Chcemy opisać położenie i orientację ostatniego ogniwa w manipulatorze, które nazywa się chwytakiem (end-effector), ostatni układ współrzędnych to jest układ efektora. Mamy też zerowy układ współrzędnych (ten nieruchomy) względem, którego wszystko chcemy przeliczać. Zwykle jest to jakiś punkt, który gdzieś się znajduje np. jakaś platforma. Układ zerowy nosi nazwę układu "podstawowego" lub "bazowego" należy go traktować jako układ przestrzeni.

Opis położenia końcówki ramienia manipulatora, który np. przykręca śrubkę. Musi być w śrubki pod dobrym kątem itp. W związku z tym naszym celem jest zorientowanie się gdzie znajduje się końcówka manipulatora, jaką ma orientację i czy jest ona dobra. Tak więc musimy wyrazić położenie końcówki względem układu podstawowego. Uzyskanie takiej transformacji nazywa się "kinematyką". Taką kinematykę wylicza się względem algorytmu **Denavita-Hartenberga**.

Za pomocą 4 parametrów chcemy opisać ruch jednego układu współrzędnych względem drugiego układu współrzędnych.

Manipulator sztywny definiujemy jako układ złożony z pewnej liczby ciał sztywnych (ramion, ogniw) połączonych przegubami. Przyjmujemy, że przeguby są typu obrotowego lub typu przesuwne; bardziej złożone przeguby można traktować jako kombinację tych dwóch typów. Ramiona manipulatora tworzą tzw. łańcuch kinematyczny. Początkiem łańcucha jest nieruchoma podstawa, a końcem – efektor manipulatora. Będziemy zakładać, że łańcuch kinematyczny jest otwarty, tzn. efektor nie pokrywa się z podstawą manipulatora. Taki manipulator nazywamy szeregowym. Liczbę przegubów manipulatora nazywamy jego liczbą stopni swobody. Jeśli jeden przegub może wykonywać dwa niezależne ruchy to każdy z nich jest niezależną liczbą stopni swobody. Schematyczny widok manipulatora szeregowego przedstawia rysunek poniżej. Na Rysunku symbole  $L_1, L_2, \dots, L_n$  oznaczają kolejne ogniwa manipulatora.



Rysunek 3.1: Sztywny manipulator szeregowy

Z reguły opisując manipulator nadajemy im nazwy związane z ilością stopni swobody. Np podwójne wahadło (RR) oznacza, że są 2 obrotowe stopnie swobody, manipulator RTR to obrotowy, przesuwny i obrotowy itp. itd..

Przez przestrzeń przegubową manipulatora rozumiemy wektor. Każda składowa tego wektora to jest położenie pojedynczego przegubu. Czyli np manipulator o 3 stopniach swobody będzie miał przestrzeń przegubową  $q_1, q_2, q_3$ .

Jeśli chcemy opisać kinematykę, czyli położenie i orientację punktu pracy/efektora względem podstawy. Wybieramy dwa specjalne układy współrzędne. Pierwszy układ współrzędnych związany jest z podstawą, jest to układ "bazowy", "podstawowy", jest nieruchomy (układ przestrzeni)(Space). Drugi układ związany jest z efektem, jest to układ ciała (Body). Chcemy za ich pomocą wyrazić kinematykę manipulatora czyli powiedzieć gdzie znajduje się efektor względem układu podstawowego i jak jest względem niego skierowany.

## 4.2 Algorytm Denavita-Hartenberga

1. Przyjmujemy oś  $Z_i$  tak, by ruch w przegubie następnym przegubie  $(i + 1)$  zachodził względem niej;
2. Prowadzimy normalną do osi  $Z_{i-1}$  i  $Z_i$ ;
3. Początek układu  $i$  umieszczamy na przecięciu normalnej z osią  $Z_i$ ;
4. oś  $X$  prowadzimy wzdłuż normalnej, oś  $Y_i$  spełnia warunek  $X_u \times Y_i = Z_i$
5. (a oś  $Y$ , nie jest nam potrzebna)
  - (a) Jeśli kolejne osie  $Z$  są równoległe (nieskończenie wiele normalnych), to wybieramy przechodzącą przez początek układu  $i - 1$
  - (b) jeśli  $Z_{i-1} = Z_i$ , to postępujemy "zgodnie ze zdrowym rozsądkiem"

$$A_{i-1}^i(q_i) = Rot(Z, q_i) \cdot Trans(Z, d_1) \cdot Trans(X, a_i) \cdot Rot(X, \alpha_i)$$

	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1				
2				
3				

## 5 Kinematyka

Współrzędne efektora:

$$y(t) = k(q(t))$$

Prędkość ruchu efektora.  $J(q)$  - jest jacobianem analitycznym:

$$\dot{y}(t) = J(q)\dot{q} \quad J(q) = \frac{\delta k}{\delta q}$$

### 5.1 Macierz kinematyki

$$K \in \mathbf{R}^6, \quad K = \begin{bmatrix} x_{ch} \\ y_{ch} \\ z_{ch} \\ \phi \\ \theta \\ \xi \end{bmatrix}$$

Pierwsze 3 elementy  $K$  określają współrzędne kartezjańskiego, drugie 3 współrzędne obrotowe.



## 5.2 Jakobian analityczny

$$J(q)_{m \times n} = \begin{bmatrix} \frac{\delta k_1}{\delta q} \\ \frac{\delta k_2}{\delta q} \\ \dots \\ \frac{\delta k_m}{\delta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta k_1}{\delta q_1} & \frac{\delta k_1}{\delta q_2} & \dots & \frac{\delta k_1}{\delta q_n} \\ \vdots & & & \\ \vdots & & & \\ \frac{\delta k_m}{\delta q_1} & \frac{\delta k_m}{\delta q_2} & \dots & \frac{\delta k_m}{\delta q_n} \end{bmatrix}$$

### 5.2.1 Zasada Pracy Wirtualnej

(Wymiennie z "Zasadą Mocy Wirtualnej")

$$\tau^T dy = f^T dq \quad \tau^T \dot{y} = f^T \dot{q} \quad \tau^T J \dot{q} = f^T \dot{q}$$

$$f = \tau J^T$$

Praca w przestrzeni zewnętrznej

Praca w przestrzeni przegubowej

$$\tau^T dy$$

$$f^T dq$$

$\tau$  - siły (/momenty sił) wywierane na chwytak

$f$  - siły (/momenty sił) wywierane w przegubach

### 5.2.2 Konfiguracje osobliwe i regularne

$$\text{rank}\{J\} \leq \min\{m, n\}$$

1. Konfiguracja regularna - jacobian nie traci rzędu
2. Konfiguracja osobliwa - jacobian traci rząd wierszowy.

Wierszowy, bo to znaczy, że pewna współrzędna w tej konfiguracji nie wpływa na położenie chwytaka.

- (a)  $m > n$  - wszystkie konfiguracje są osobliwe;
- (b)  $m = n$  - osobliwa, tylko i tylko wtedy, gdy  $\det J = 0$ ;
- (c)  $m < n$  (przypadek redundantny) osobliwość, gdy wszystkie minory stopnia  $m$  są równe 0 ("największe możliwe minory").

## 6 Jakobian geometryczny

Jest niezależny od wyboru współrzędnych.

Jakobian analityczny oraz jacobian geometryczny mają identyczną część odpowiadającym współrzędnym położenia.

### 6.1 Jakobian geometryczny w przestrzeni 6.2 Jakobian geometryczny w ciele

$$J_S(q)\dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{T} + [T]\omega_S \\ \omega_S \end{pmatrix} \quad J_B(q)\dot{q} = \begin{pmatrix} R^T \omega_B \\ \omega_B \end{pmatrix}$$

Przekształcenia:

$$J_S(q) = \begin{bmatrix} R & [T]R \\ 0 & R \end{bmatrix} J_B(q)$$

$$J_S(q) = \begin{bmatrix} I_3 & [T] \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} J_M(q)$$

Przypomnienie

$$T = (T_1, T_2, T_3)^T$$

$$[T] = \begin{bmatrix} 0 & -T_3 & T_2 \\ T_3 & 0 & -T_1 \\ -T_2 & T_1 & 0 \end{bmatrix}$$

### 6.3 Jakobian manipulatora

”Jakobian oderwany od współrzędnych. Wskazuje prawdziwe osłabiwości, nie tylko zależne od współrzędnych”  
Opisuje prędkość efektora na skutek działania pojedynczego stopnia swobody. Przelicza się ten ruch do układu podstawowego  $X_0, Y_0, Z_0$

$$J_M(q)\dot{(q)} = \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \omega_s \end{bmatrix} = [J_{M1}(q)\dot{q}_1, J_{M2}(q)\dot{q}_2, \dots J_{Mn}(q)\dot{q}_n,]$$

Unieruchamiamy wszystkie przeguby oprócz i-tego i sprawdzamy wpływ ruchu stopnia i-tego na chwytak.

1. Dla przegubu obrotowego i-tego:

Prędkość kątowna:

$$e_3 \cdot \dot{q}_i$$

Przeliczone do układu podstawowego  $X_0Y_0Z_0$ :

Prędkość kątowna:

$$R_0^{i-1}e_3\dot{q}_i$$

Prędkość liniowa:

$$-T_{i-1}^n \times e_3\dot{q}_i = e_3\dot{q}_iT_{i-1}^n$$

Prędkość liniowa:

$$-R_0^{i-1}(T_{i-1}^n \times e_3\dot{q}_i)$$

$$J_{mi} = \begin{bmatrix} (R_{0,3k}^{i-1} \times (T_0^m - T_0^{i-1})) \\ R_{0,3k}^{i-1} \end{bmatrix}$$

2. Dla przegubu przesuwneego i-tego:

Prędkość kątowna:

$$0$$

Przeliczone do układu podstawowego  $X_0Y_0Z_0$ :

Prędkość kątowna:

$$0$$

Prędkość liniowa:

$$e_3\dot{q}_i$$

Prędkość liniowa:

$$R_0^{i-1} \cdot e_3 \cdot \dot{q}_i$$

$$J_{mi} = \begin{bmatrix} (R_{0,3k}^{i-1}) \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix}$$

$$R_0^0 = \mathbf{1}_{3 \times 3} \quad T_0^0 = (0; 0; 0)^T$$

## 6.4 Miary zręczności manipulator

Elipsoida manipulowalności

Jakobian przekształca prędkości

$$\dot{y} = J(q)\dot{q}$$

Pseudoodwrotność Moore'a-Penrouse'a

$$J^\# = J^T(JJ^T)^{-1}$$

Definiujemy sferę jednostkową w konkretnej przestrzeni przegubowej, taką że

$$S(q) = \{\dot{q} \in R^n : \|\dot{q}\|^2 = 1\}$$

I obliczamy jej obraz w przestrzeni prędkości

$$E(q) = J(q)S(q) = \{\dot{y} = J(q)\dot{q}, \|\dot{q}\|^2 = 1\}$$

$$\|\dot{q}\|^2 = \dot{y}^T J^\# \dot{y} = 1$$

$$M(q) = JJ^T$$

Objętość elipsoidy, manipulowalność

$$m(q) = \sqrt{\det M(q)}$$

Współczynnik uwarunkowania

$$K(q) = \sqrt{\frac{\dots}{\dots}}$$

## 7 Dynamika sztywnego manipulatora

Energię sumujemy względem nieruchomego układu podstawowego  $X_0Y_0Z_0$

Położenie masy względem układu podstawowego:

$$S_i = A_0^i(q_1, \dots, q_i)r_i \quad \dot{S}_i = \dot{A}_0^i r_i$$

$r_i$  - położenie względem układu lokalne  $X_iY_iZ_i$

### 7.0.1 Macierz pseudoinercji

$$J_{L_i} = \int_{L_i} r_i r_i^T dm = \int_{L_i} \begin{bmatrix} x^2 & xy & xz & x \\ yx & y^2 & yz & y \\ zx & zy & z^2 & z \\ x & y & z & 1 \end{bmatrix} dm$$

### 7.0.2 Energia kinetyczna

Energia kinetyczna ogniwa  $L_i$ :

$$K_i = \frac{1}{2} tr \left\{ (\dot{A}_0^i) \int_{L_i} r_i r_i^T dm (\dot{A}_0^i)^T \right\}$$

$$K_i = \frac{1}{2} tr \left\{ (\dot{A}_0^i) J_{L_i} (\dot{A}_0^i)^T \right\}$$

Energia kinetyczna dla całego układu

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}$$

$M(q)$  - macierz bezwładności (dodatnio określona  $A > 0$ )

### 7.0.3 Energia potencjalna

Energia potencjalna ogniwa

$$V_i(q) = -m_i < g, A_0^i, r_i >$$

$g = (g_x, g_y, g_z, 0)^T$  - Wektor przyspieszenia ziemskiego

$< A_0^i, r_i >$  - odpowiada masie ogniwa

Energia potencjalna całego układu

$$V(q) = \sum_{i=1}^n V_i(q)$$

Napędy uwzględniamy poprzez:

$$I(q) = \frac{1}{2} I_i \dot{q}_i^2$$

Gdzie:  $I_i$  - moment bezwładności silnika  $i$

### 7.0.4 Lagranżjan dla całego układu

$$L(q, \dot{q}) = E_k(q) + V(q) + I(q)$$

Równanie Lagrange'a (równanie dynamiki):

Energia:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta \mathbf{L}}{\delta \dot{q}} \right) - \frac{\delta \mathbf{L}}{\delta q} = 0$$

$$\mathbf{L}(q, \dot{q}) = E_k - V$$

## 8 Kinematyka robota mobilnego

BPB - Brak poślizgu bocznego:

$$\dot{x}\sin\phi - \dot{y}\cos\phi = 0$$

BPW - Brak poślizgu wzdłużnego:

$$\dot{x}\sin\phi - \dot{y}\cos\phi - r\dot{\theta} = 0$$

$(x, y)$  - współrzędne koła względem układu globalnego;

$\phi$  - orientacja koła względem  $X_0$  układu globalnego;

$r$  - promień koła;

$\dot{\theta}$  - prędkość obrotowa koła;

Ograniczenia Pfaffa:

$$A(q) \cdot \dot{q} = 0$$

$A(q)$  - Macierz ograniczeń, zbiór równań BPB, PBW;

## 9 Przydatne wzorki

### 9.1 Trygonometria

Suma kątów

$$\sin\alpha \pm \sin\beta = 2\sin\frac{(\alpha \pm \beta)}{2}\cos\frac{(\alpha \mp \beta)}{2}$$

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\frac{(\alpha + \beta)}{2}\cos\frac{(\alpha - \beta)}{2}$$

Wartości funkcji

	0°	30°	45°	60°	90°	180°
	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
<i>sin</i>	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	0
<i>cos</i>	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	-1
<i>tg</i>	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	-	0
<i>ctg</i>	-	$\sqrt{3}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	-

Funkcje sumy kątów lub ich wielokrotności

$$\sin(x \pm y) = \sin(x)\cos(y) \pm \cos(x)\sin(y)$$

$$\cos(x \pm y) = \cos(x)\cos(y) \mp \sin(x)\sin(y)$$

$$\sin(2x) = 2\sin(x)\cos(x)$$

$$\cos(2x) = \sin^2x - \cos^2x$$

Wzory redukcyjne

Parzystość f.	Nieparzystość f.
$\cos(x) = \cos(-x)$	$\sin(-x) = -\sin(x)$
	$\operatorname{tg}(-x) = -\operatorname{tg}(x)$
	$\operatorname{ctg}(-x) = -\operatorname{ctg}(x)$

$$\sin\left(x \pm \frac{\pi}{2}\right) = \pm\cos(x)$$

$$\cos\left(x \pm \frac{\pi}{2}\right) = \mp\sin(x)$$