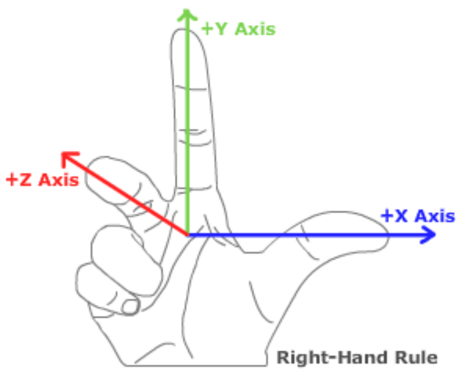
07. Kinematika, inverz kienamtika, Szimulált robotkar programozása csukló-, és munkatérben

> **Warning**
>
> **ZH2** (Roslaunch, ROS paraméter szerver. Kinematika, inverz kinematika.) és a **Kötelező program bemutatás december 6.**

Ismétlés

3D transzformációk

- 

  Pozíció: 3 elemű offszet vektor
- **Orientáció:** 3 x 3 rotációs matrix
  - további orientáció reprezentációk: Euler-szögek, RPY, angle axis, quaternion
- **Helyzet** (pose): 4 × 4 transzformációs mártrix
- **Koordináta rendszer** (frame): null pont, 3 tengely, 3 bázis vektor, jobbkéz-szabály
- **Homogén transzformációk:** rotáció és transzláció együtt
  - pl. \(\mathbf{R}\) rotáció és \(\mathbf{v}\) transzláció esetén:

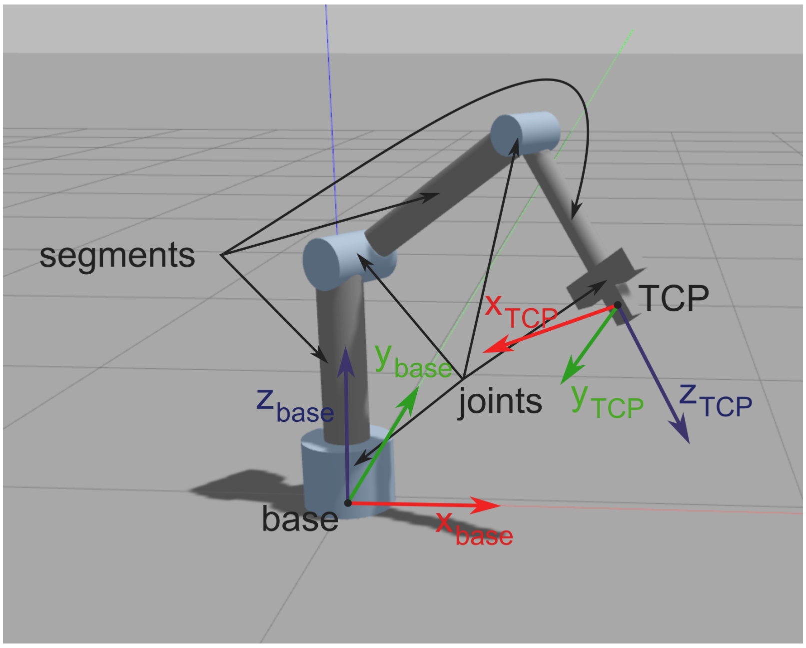
$$ \mathbf{T} = \begin{bmatrix}\mathbf{R} & \mathbf{v}\\\mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & v_x\\r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & v_y\\r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & v_z\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

- **Homogén koordináták:**
  - **Vektor:** 0-val egészítjük ki, $\mathbf{a_H}=\begin{bmatrix}\mathbf{a} \\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0\end{bmatrix}$
  - **Pont:** 1-gyel egészítjük ki, $\mathbf{p_H}=\begin{bmatrix}\mathbf{p} \\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1\end{bmatrix}$
  - Transzformációk alkalmazása egyszerűbb:

$$ \mathbf{q} = \mathbf{R}\mathbf{p} + \mathbf{v} \to \begin{bmatrix}\mathbf{q} \\ 1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{R} & \mathbf{v}\\\mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix}\mathbf{p} \\ 1\end{bmatrix} $$

- **Szabadsági fok** (DoF): egymástól független mennyiségek száma.

Robotikai alapok



- Robotok felépítése: **szegmensek** (segment, link) és **csuklók** (joints)
- **Munkatér** (task space, cartesian space):
  - Háromdimenziós tér, ahol a feladat, trajektóriák, akadályok, stb. definiálásra kerülnek.

    - **TCP** (Tool Center Point): az end effektorhoz rögzített koordináta rendszer (frame)
    - **Base/world frame**
- **Csuklótér** (joint space):
    - A robot csuklóihoz rendelt mennyiségek, melyeket a robot alacsony szintű irányító rendszere értelmezni képes.
    - csukló koordináták, sebességek, gyorsulások, nyomatékok...

Elmélet

Kinematika, inverz kinematika

> **Def. Kinematika**
>
> A TCP (vagy bármi más) helyzetének kiszámítása a csukló koordinátákból.

- Kinematikai modell
    - Denavit--Hartenberg (HD) konvenció
    - URDF (Unified Robotics Description Format, XML-alapú)

Ha a segmensekhez rendelt koordináta rendszerek rendre $base, 1, 2, 3, ..., TCP$, a szomszédos i and $i+1$ szegmensek közötti transzfomrációk $T_{i+1,i}(q_{i+1})$ (mely a közbezárt csukló szögének függvénye), a transzfomráció a base frame és a TCP között felírható (n csuklós robotra):

$$T_{TCP,base}(q_1, \cdots, q_n) = T_{TCP,n-1}(q_{n}) \cdot T_{n-1,n-2}(q_{n-1}) \cdots T_{2,1}(q_2) \cdot T_{1,base}(q_1) \cdot base$$

> **Def. Inverz kinematika**
>
> Csukló koordináták kiszámítása a (kívánt) TCP (vagy bármi más) pose eléréséhez.

Differenciális inverz kinematika

> **Def. Differenciális inverz kinematika**
>
> A csukló koordináták mely változtatása éri el a kívánt, **kis mértékű változást** a TCP helyzetében (rotáció és transzláció).

- **Jacobi-mátrix** (Jacobian): egy vektorértékű függvény elsőrendű parciális deriváltjait tartalmazó mátrix.

  $$ \mathbf{J} = \left[\matrix{\frac{\partial x_1}{\partial q_1} & \frac{\partial x_1}{\partial q_2} &\frac{\partial x_1}{\partial q_3} & \dots &\frac{\partial x_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial x_2}{\partial q_1} & \frac{\partial x_2}{\partial q_2} &\frac{\partial x_2} {\partial q_3} & \dots &\frac{\partial x_2}{\partial q_n} \\ \frac{\partial x_3}{\partial q_1} & \frac{\partial x_3}{\partial q_2} &\frac{\partial x_3}{\partial q_3} & \dots &\frac{\partial x_3}{\partial q_n} \\ \vdots &\vdots &\vdots &\ddots &\vdots \\ \frac{\partial x_m}{\partial q_1} & \frac{\partial x_m}{\partial q_2} &\frac{\partial x_m}{\partial q_3} & \dots &\frac{\partial x_m}{\partial q_n} \\}\right] $$

- **Jacobi-mátrix jelentősége robotikában**: megadja az összefüggést a csuklósebességek és a TCP sebessége között.

  $$ \left[\matrix{\mathbf{v} \\ \mathbf{\omega}}\right] =\mathbf{J}(\mathbf{q})\cdot \mathbf{\dot{q}} $$

Inverz kinematika Jacobi inverz felhasználásával

1. Számítsuk ki a kívánt és az aktuális pozíció különbségét: $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_{desired} - \mathbf{r}_0$
2. Számítsuk ki a rotációk különbségét: $\Delta\mathbf{R} = \mathbf{R}_{desired}\mathbf{R}_{0}^{T}$, majd konvertáljuk át axis angle reprezentációba $(\mathbf{t},\phi)$
3. Számítsuk ki $\Delta\mathbf{ q}=\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q_0})\cdot \left[\matrix{k_1 \cdot \Delta\mathbf{r} \\ k_2 \cdot \phi \cdot \mathbf{t}}\right]$, ahol az inverz lehet pszeudo-inverz, vagy transzponált
4. $\mathbf{q}_{better} = \mathbf{q}_{0} + \Delta\mathbf{q}$

Gyakorlat

1: Install rrr-arm

1. Telepítsük a dependency-ket.

```
sudo apt update
sudo apt-get install ros-noetic-effort-controllers
sudo apt-get install ros-noetic-position-controllers
sudo apt-get install ros-noetic-gazebo-ros-pkgs
sudo apt-get install ros-noetic-gazebo-ros-control
sudo apt-get install ros-noetic-gazebo-ros
pip3 install kinpy
rosdep update
```

> **Tip**
>
> A `kinpy` csomag forrását is töltsük le, hasznos lehet az API megértése szempontjából: https://pypi.org/project/kinpy/

2. Clone-ozzuk és build-eljük a repo-t.

```
cd ~/catkin_ws/src
git clone https://github.com/Robotawi/rrr-arm.git
cd ..
catkin build
```

3. Teszteljük a szimulátort, új teminál ablakokban:

```
roslaunch rrr_arm view_arm_gazebo_control_empty_world.launch
```

```
rostopic pub /rrr_arm/joint1_position_controller/command  std_msgs/Float64 "data: 1.0"
&    rostopic pub /rrr_arm/joint2_position_controller/command  std_msgs/Float64 "data:
1.0" & rostopic pub /rrr_arm/joint3_position_controller/command  std_msgs/Float64
"data: 1.5" & rostopic pub /rrr_arm/joint4_position_controller/command std_msgs/
Float64 "data: 1.5"
```

> **Tip**
>
> A szimulátor panaszkodni fog, hogy "No p gain specified for pid...", de ez nem okoz gondot a működésében.

4. Állítsuk elő a robotot leíró urdf fájlt:

```
cd ~/catkin_ws/src/rrr-arm/urdf
rosrun xacro xacro rrr_arm.xacro > rrr_arm.xacro.urdf
```

2: Robot mozgatása csuklótérben

1. Iratkozzunk fel a robot csuklószögeit (konfigurációját) publikáló topicra. Hozzunk létre publisher-eket a csuklók szögeinek beállítására használható topic-okhoz.

> **Warning**
>
> A Kinpy és a ROS nem mindig azonos sorrendben kezeli a csuklószögeket. Az alábbi két sorrend fordul elő: **1. [gripper_joint_1, gripper_joint_2, joint_1, joint_2, joint_3, joint_4]** - `/rrr_arm/joint_states` topic - `kp.jacobian.calc_jacobian(...)` függvény
>
> **2. [joint_1, joint_2, joint_3, joint_4, gripper_joint_1, gripper_joint_2]** - `chain.forward_kinematics(...)` függvény - `chain.inverse_kinematics(...)` függvény

2. Mozgassuk a robotot [1.0, 1.0, 1.5, 1.5] konfigurációba.

3. Kinematika

1. Importáljuk a `kinpy` csomagot és olvassuk be a robotot leíró urdf fájlt:

```python
import kinpy as kp

chain = kp.build_serial_chain_from_urdf(open("/home/<USERNAME>/catkin_ws/src/
rrr-arm/urdf/rrr_arm.xacro.urdf").read(), "gripper_frame_cp")
print(chain)
print(chain.get_joint_parameter_names())
```

2. Számítsuk ki, majd irassuk ki a TCP pozícióját az adott konfigurációban a `kinpy` csomag segítségével. A https://pypi.org/project/kinpy/ oldalon lévő példa hibás, érdemes az alábbi példa kódból kiindulni:

```
th1 = np.random.rand(2)
tg = chain.forward_kinematics(th1)
th2 = chain.inverse_kinematics(tg)
self.assertTrue(np.allclose(th1, th2, atol=1.0e-6))
```

4: Inverz kinematika Jacobi inverz módszerrel

Írjunk metódust, amely az előadásban bemutatott Jakobi inverz módszerrel valósítja meg az inverz kinematikai feladatot a roboton. Az orientációt hagyjuk figyelmen kívül. Mozgassuk a TCP-t a `(0.59840159, -0.21191189,  0.42244937)` pozícióba.

1. Írjunk egy ciklust, melynek megállási feltétele a `delta_r` megfelelő nagysága, vagy `rospy.is_shutdown()`.

2. Számítsuk ki a kívánt és a pillanatnyi TCP pozíciók különbségét (`delta_r`). Skálázzuk `k_1` konstanssal.

3. `phi_dot_t` legyen `[0.0, 0.0, 0.0]` (ignoráljuk az orientációt).

4. Konkatenáljuk `delta_r` és `phi_dot_t`-t.

5. Számítsuk ki a Jacobi mátrixot az adott konfigurációban a `kp.jacobian.calc_jacobian(...)` függvény segítségével.

6. Számítsuk ki Jacobi mátrix pszeudo-inverzét `np.linalg.pinv(...)`.

7. A fenti képlet segítségével számítsük ki `delta_q`-t.

8. Növeljük a csuklószögeket a kapott értékekkel.

Bónusz: Inverz kinematika orientációval

Egészítsük ki az előző feladat megoldását úgy, hogy az orientációt is figyelembe vesszük az inverz kinematikai számítás során.

Hasznos linkek

- rrr-arm model
- https://pypi.org/project/kinpy/
- https://en.wikipedia.org/wiki/Axis%E2%80%93angle_representation
- https://www.rosroboticslearning.com/jacobian