
IPARI ROBOTOK KINEMATIKÁJA ÉS DINAMIKÁJA

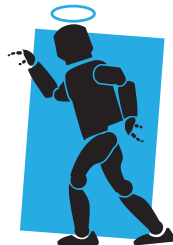
II. ROBOT STRUKTÚRÁK

Összeállította: Dr. Kuti József
Szerkesztette: Dr. Galambos Péter



Óbudai Egyetem
Pro Scientia et Futuro

2019. február 21.
Budapest



Bejczy Antal iRobottechnikai
Központ



Robot:

- Irányított mechanizmus
- Előírható (programozható) pályán mozog
- Amely mentén feladatokat végez

A feladatok sokfélék lehetnek:

- No kontakt
- Anyagmozgatás
- Megmunkálás

Fő szempontok:

- mozgástartomány (az elérhető pozíciók, orientációk halmaza)
- ismétlési pontosság, abszolút pontosság
- teherbírás
- elérhető sebesség, gyorsulások (rendszerint csuklósebességekben, csuklógyorsulásokban)



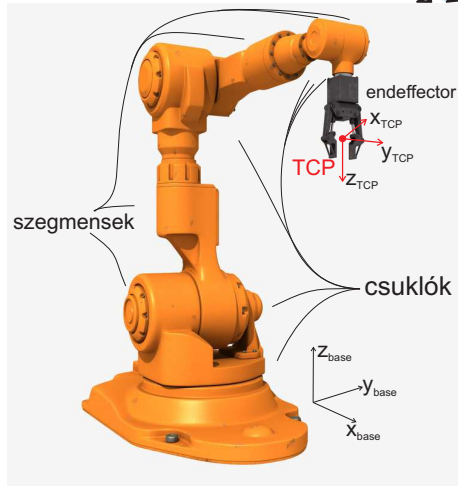
A robot struktúrája

- szegmensek (tagok, linkek)
- csuklók (izület, joint)
- és az utolsó szegmenshez rögzített végberendezés (end effector),

Kitüntetett

koordinátarendszerek:

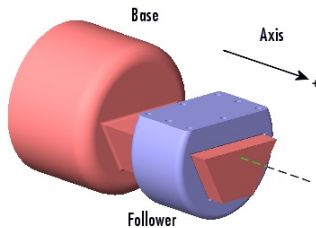
- TCP (Tool Center Point): szerszámközéppont (vagy E, mint Endeffector)
TCP koordinátarendszer: a TCP-hez rögzített koordinátarendszer
- Az alkalmazással kapcsolatos álló koordinátarendszer: bázis (világ/base/world/cella) koordinátarendszer



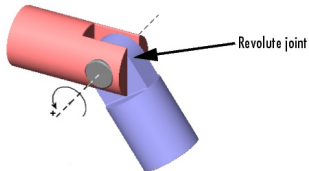


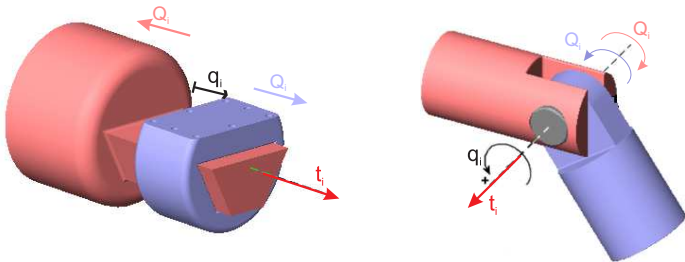
Csuklótípusok:

- transzlációs csuklók (lineáris csuklók, prismatic/sliding joint)



- rotációs csuklók (revolute joint)





Az i -dik csukló helyzetét a **tengelyével** (\mathbf{t}_i) adjuk meg:

- az elmozdulás iránya
- az elfordulás tengelye

Aktuális állapotát **csuklóváltozókkal** (q_i) adjuk meg:

- az elmozdulás nagysága,
- az elfordulás szöge

adott referenciahelyzethez képest. (Deriváltja: **csuklósebesség** (\dot{q}_i) (sebesség/szögsebesség), második deriváltja: **csuklógyorsulás** (\ddot{q}_i) (gyorsulás/szöggyorsulás).)

Mozgatás: a **csuklónyomatékokkal** (Q_i), amit a (közvetlenül/áttétellel/golyósorsóval/stb.) kapcsolódó motor fejt ki.

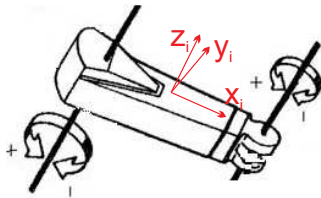
- Transzlációs csukló esetén: csuklónyomaték = csuklótengely irányú erők
- Rotációs csukló esetén: csuklónyomaték = a csuklótengely körül forgató (forgató)nyomatékok



Szegmensek: kijelölik a csuklótengelyek

- pozíció különbségét (leírható egy 3 elemű vektorral)
- orientáció különbségét (leírható 3 szöggel, lásd később)

Merev testnek tekintjük (nincs deformáció). Koordinátarendszert rögzítünk hozzá, a csuklótengelyeket, geometriát ebben adjuk meg.



Ennek leírása (a későbbiekben) konvenciók formájában:
Denavit-Hartenberg alak.



Végberendezés az utolsó szegmensre szerelve:

- pneumatikus, vákuum, elektromágneses, hidraulikus megfogó
- 2,3, (5) ujjas szervó
- hegesztő, festő, csiszoló, polírozó, lézer, plazma vágás,
- fúró-, marófej, mérőeszköz, kamera, stb.



Tool Center Point: a megfogóhoz képest elhelyezett, egy kitüntetett pont, TCP koordinátarendszer: ahhoz rögzítve.



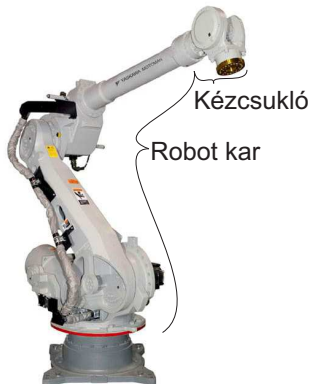
Struktúra az emberi kéz analógiájára :

- kézfej (hand): az utolsó szegmens és a végberendezés,
- kézcsukló (wrist): az orientálást végző utolsó 3 csukló és a kapcsolódó szegmensek,
- robotkar (arm): a pozicionálásban fő szerepet játszó további csuklók és a kapcsolódó szegmensek,

Felépítésben

az ipari robotokban is megjelenik

- az endeffektor orientációjának finom módosítása a robotkar mozgatása nélkül lehetséges
- az inverz geometria számítása is dekomponálható





DEFINÍCIÓ

Az összes lehetséges mozgás paraméterezéséhez minimálisan szükséges skalárfüggvények száma.

Például:

- szabadon mozgó anyagi pont esetén 3 (pl.: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$)
- inga síkban esetén 1 (pl. $\varphi(t)$)
- szabadon mozgó merev test esetén 6 (pl.: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$)
- szabad síkmozgás esetén 3 (pl.: $x(t)$, $y(t)$, $\varphi(t)$)



6 csukló esetén már lehet olyan térrész, ahol az endeffektor

- tetszőleges (x, y, z) helyzetbe (3DOF) és
- tetszőleges (α, β, γ) orientációba (3DOF)

mozgatható, azaz tetszőleges pózba.

Kevesebb csukló: a koordináták biztosan nem irányíthatóak egymástól függetlenül, vagy egyáltalán



N csukló $\neq N$ szabadságfok a TCP-ben

Példa:

- 7 csuklós robotkar: ekkor is max. 6 szabadságfoknak megfelelően mozgathatjuk a TCP-t $\rightarrow N_{joints} > N_{DoF}$
- 6 csuklós *RRRRRR* robotkar, párhuzamos csuklótengelyekkel, csak síkban képes mozgatni (3DoF) $\rightarrow N_{joints} > N_{DoF}$
- stb.

Rendszerint vannak olyan, ún. szinguláris csuklókoordináták, ahol a lehetőségek még lecsökkennek

REDUNDÁNS ROBOTKAR

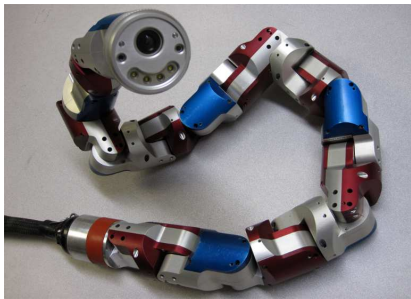
Ha a csuklók száma nagyobb, mint az azzal elért TCP szabadságfokok száma, azaz $N_{joints} > N_{DoF}$.

(Nem a szinguláris konfigurációkra, hanem a normál állapotokra vonatkozik.)



Célok:

- nagyobb mozgástartomány
- vannak térrészek, amelyek többféleképpen is elérhetőek (választható terhelhetőség, minimális elmozdulás a kiindulási helyzethez képest, „elegancia”,...)



Pl.: KUKA IIWA, kígyószerű sokszegmenses robotok...



A csuklók típusának (R:rotáció, T:transzláció) felsorolása a láncban a bázistól a végberendezés felé haladva.

Például a gömbkoordinátás kar: RRT (lásd később...)

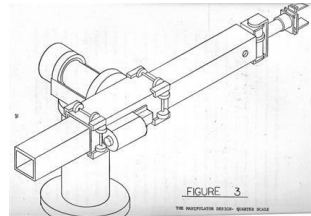
Kiegészíthető a tengelyek offszetéről és irányáról további információval:

- ha a csukló tengelye nem metszi az előzőét: $R_{offset\ x/y/z}$
- ha a tengelyek merőlegesek: T^{\perp}
- ha párhuzamosak: T^{\parallel}

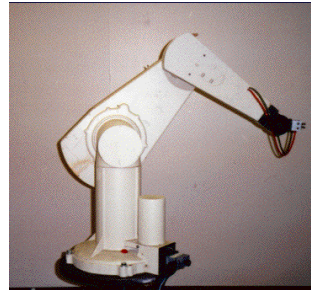
Például a Scara robotkar: $RR^{\parallel}T^{\parallel}$ (lásd később...)



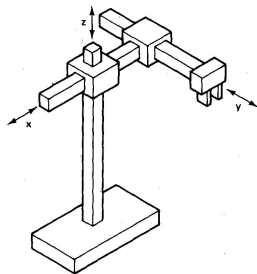
- Stanford-kar
(Gömbkoordinátás (spherical)
kar):
 $RR^{\perp}T^{\perp}$



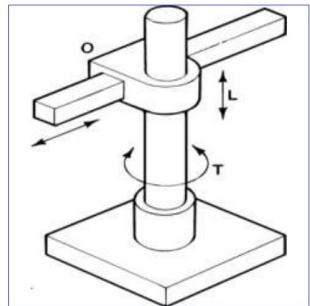
- Elbow manipulator (Revo-
lute/anthropomorphic/articulated
arm)
(PUMA 560, ABB IRB1400):
 $RR^{\perp}R^{\parallel}$



- Cartesian-kar: $TT^\perp T^\perp$



- Hengerkoordinátás-kar
(Cylindrical arm): $RT^\parallel T^\perp$



Scara robotkar:

- $RR\parallel T\parallel$

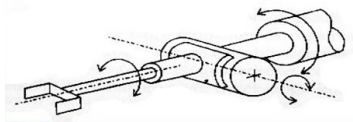


- $TR\parallel R\parallel$





- Euler kézcsukló: $RR^{\perp}R^{\perp}$

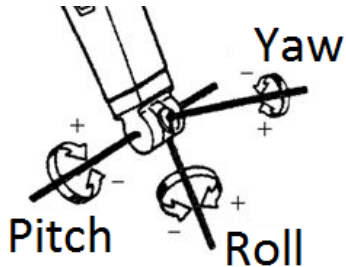


- RPY kézcsukló: $RR^{\perp}R^{\perp}$

Roll: csavarás

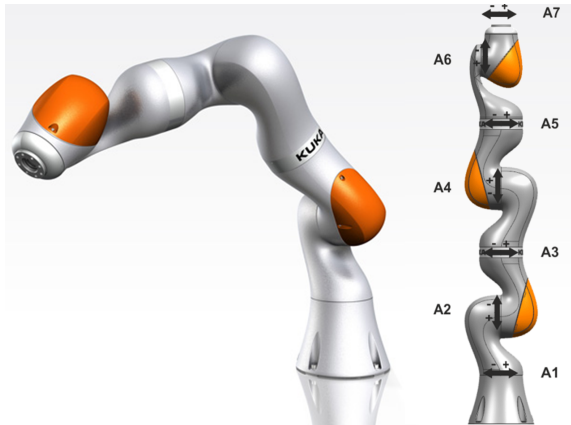
Pitch: billentés

Yaw: forgatás





7 csuklós robotkar:



$RR^{\perp}R^{\perp}R^{\perp}R^{\perp}R^{\perp}$

A vége egy Euler csukló - és az eleje is...

ELÉRHETŐ TARTOMÁNY (REACH)

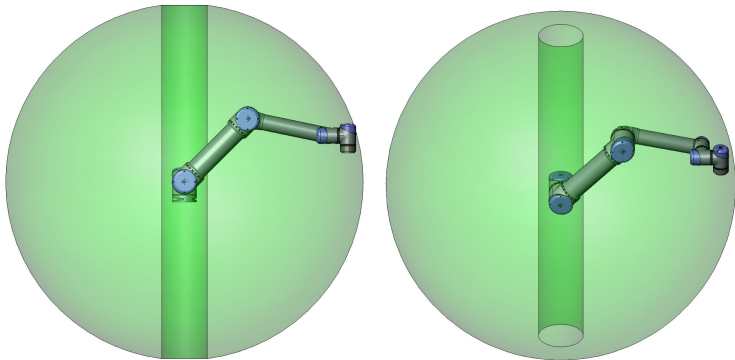


A geometriából és a csuklózó tartományából származik.

Például az UR5 roboton:

Minden csukló: $\pm 360[\text{deg}]$

Így az elérhető tartomány:



ahol a tartomány sugara $r = 850[\text{mm}]$



A 3D tér feladatközpontú leírása: a lehetséges pozíciókat (3 elemű vektor) és orientációkat (pl. 3 szög) leírva.

Ennek része az elérhető tartomány

Itt tárgyalható:

- TCP (aktuális \leftrightarrow kívánt):
 - helyzete, orientációja (röviden TCP póz)
 - sebessége, szögsebessége
 - gyorsulása, szöggyorsulása
- Erők, nyomatékok (gravitáció, terhelés, kontakterő,...)
- A robotkar helyzete (ütközésvizsgálat)
- Elkerülendő akadályok
- Geometriai, mechanikai tulajdonságok



A robot állapotának megvalósítás központú (egyértelmű) leírása

Jellemzők:

- csuklóváltozók, csuklósebességek, csuklógyorsulások (jelenlegi és kívánt értékek) vektora
- csuklónyomatékok (és motor áram, feszültség)
- ezek korlátozásai:
 - megvalósítható csuklóváltozó értékek (geometria)
 - használható csuklósebességek, -gyorsulások, -nyomatékok (műszaki korlátok...)

Robot aktuális/kívánt állapotát, a beavatkozók állapota, korlátai itt tárgyalható – a működtetéshez elengedhetetlen



Robotmodellezés: a csuklóváltozók terében és a Cartesian terében adott jellemzők kapcsolatának leírása

Szintjei:

- Geometriai szint
- Kinematikai szint
- Dinamikai szint

(Az angolszász irodalomban:

- geometria \rightarrow kinematika,
- kinematika \rightarrow differenciális kinematika)



- Direkt feladat: adott csuklóváltozók esetén, mi a TCP (Cartesian térbeli) helyzete, orientációja
- Inverz feladat: milyen csuklóváltozó értékekkel érhető el egy TCP helyzet és orientáció (egyáltalán elérhető-e, ha igen hány módon lehetséges...)

Megjegyzés: a csuklóváltozók lehetséges értéke korlátozott (ön és környezettel ütközés miatt is)

Rotációs csuklók esetén összetett nemlineáris függvény, a robot geometria alapján



- Direkt feladat:
kis (differenciális) mozgások leírása a csuklóváltozóknak \rightarrow
Cartesian pozíciók és orientációk változása
(*a csuklók kis változása hogyan hat a TCP pózra...?*)
- Inverz feladat:
Cartesian pozíciók és orientációk változása \rightarrow kis
(differenciális) mozgások leírása a csuklóváltozóknak
(*hogyan változnak a csuklók, a TCP póz bizonyos változtatásához...?*)

Továbbá a csuklósebességek és a Cartesian sebességek és szögsebességek kapcsolata

(Ez alapján szöggyorsulások és Cartesian gyorsulások, szöggyorsulások kapcsolata is megadható)

Mutatja van-e olyan irány, amelybe nem lehetséges elmozdulni (– szinguláris helyzetek)



Dinamikai modell (általában): *az erők, nyomatékok alapján megadja a gyorsulást, így a mozgást.*

A robotika dinamikai alapegyenlete leírja a

- terhelések (erők, nyomatékok), csuklónyomatékok és a
- csuklógyorsulások

közötti összefüggést.

Hasonlóan, mint anyagi pont mozgását (aktuális gyorsulását) az

$$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots = m\mathbf{a}$$

mozgásegyenlet határozza meg.

Az összefüggés alapján meghatározható

- hogyan mozog a robot, adott terhelések, csuklónyomatékok esetén
- adott terhelések hogyan komenzálhatóak
- adott terhelések, kívánt csuklógyorsulás milyen csuklónyomatékokkal érhető el

Szabályozási módszerek alapvető összefüggése.



Robotkarok technológiai jellemzői



Belső szenzorok:

- A csuklóváltozók közvetlen mérése
- A csuklónyomatékok (a csuklót adott helyzetben tartó, adott sebességgel/gyorsulással mozgatásához szükséges erő/nyomaték) mérése a motoráramokból

Külső szenzorok:

- Tapintás
- Közeliségérzékelés
- Az endeffektor helyzetének közvetlen mérése
- A végberendezésre ható erő

A feladathoz szükséges minimális szenzorozottság



- a szerkezet terhelhetősége, teherbírása
- a szegmensek nem ideális merev testek - kismértékben rugalmasak, terhelésfüggő deformáció
- korlátozott csuklónyomatékok, motoráramok, csuklósebességek
- a szabályozó algoritmus tulajdonságai
- súrlódás, kotyogás: az áttételek
- jelfeldolgozás, számítási idők

A robotgyártók feladata: robusztus gépészeti szerkezet, pontos, gyors mozgást lehetővé tevő felépítés, olyan vezérléssel, amiben megadható a kívánt nyomaték/csuklászög/csuklászögsebesség vagy gyorsulás.



Ismétlési pontosság (repeatability):

- Az újra és újra ugyanazon helyzetbe mozgás mekkora pozíció és orientáció szórással lehetséges
- Függ: szerkezet merevsége, szenzorok, beavatkozó egységek karakterisztikája, szabályozó algoritmus
- A robotgyártók rendszerint garantálják, hogy kicsi $\sim 0.1[mm]$

Abszolút pontosság:

- Adott Cartesian (x,y,z koordinátába) pozícióba mozgás mekkora átlagos hibával történik (rendszeres hiba, átlag)
- Függ: a robot geometriája mennyire követi a dokumentációban rögzített / robotvezérlőbe felprogramozott modellt (gyártási hibák) \rightarrow Kalibrálással csökkenthető
- Rendszerint nincs garantált felső értéke (akár 5-10[mm]), bemozgatásos betanításnál nincs jelentősége, összetett irányításhoz pontos geometriai modell szükséges



Terhelés (Payload): 5[kg] (a végberendezéssel együtt)

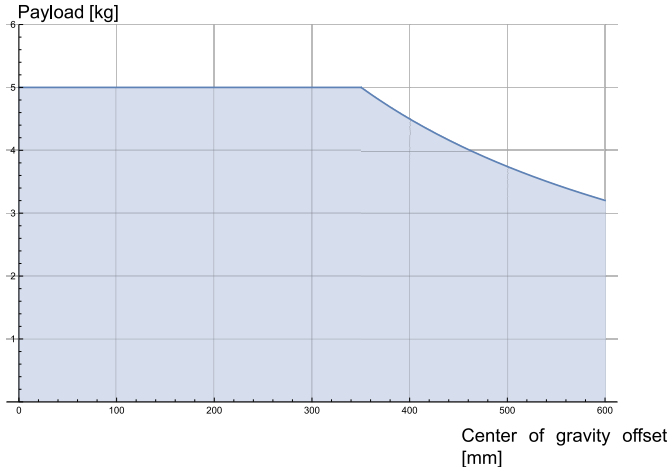


Figure 4.3: Relationship between the maximum allowed payload and the center of gravity offset.



Ismétlési pontosság (repeatability): $\pm 0.1[mm]$

Elérhető csuklósebességek: max. $180[deg/s]$

Tool sebesség: max. $1[m/s]$

Gyorsulás: korlátozott

Mozgás megvalósítása:

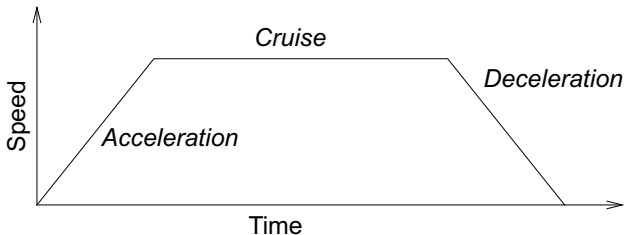


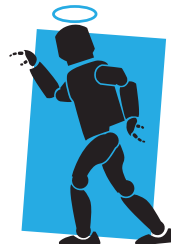
Figure 14.1: Speed profile for a motion. The curve is divided into three segments: acceleration, cruise and deceleration. The level of the cruise phase is given by the speed setting of the motion, while the steepness of the acceleration and deceleration phases is given by the acceleration parameter.

Csak a csuklót változtatjuk mérve.

Köszönöm a figyelmet!



Óbudai Egyetem
Pro Scientia et Futuro



Bejczy Antal iRobottechnikai
Központ