

Robotok Irányítása - Bevezető

Történelmi áttekintés

Az "automata" görög eredetű összetett szó. Az "autos" szó jelentése "önmaga", a "motos" szó jelentése "mozogni".

Az önmagától mozgó, élőlényre hasonlító tárgyak a legrégebbi időktől foglalkoztatták az embereket, már azokban az időkben is, amikor a tudományos és technikai fejlődés még nem tette lehetővé a megvalósításukat. Ennek megfelelően az automata eszközök először a legendákban, a mondavilágban jelennek meg. Néhány példa:

- Egyiptomban Seth isten testvére olyan élő szobrokat alkotott, amelyek az emberekkel összetéveszthetőek voltak.
- A görög mitológiában Héphaitosznak, az isteni kovácsnak aranyból készített lányai voltak.
- Minosz a krétai király életre keltett egy bronzszobrot (Thalos), amely aztán a szigetet védelmezte.
- A zsidó mondavilágban a Gólem egy agyagból készült emberszerű lény jelenik meg.
- Indiában egy legenda szerint Buddha relikviáit mechanikus robotok őrizték (bhuta vahana yanta – spirit movement machines)

Az ókor végén, valamint a középkorban megszülettek az első feljegyzések megvalósított automata eszközökről. Feljegyezték, hogy 1088-ban Su Song (Kína) zenélni képes mechanikus manökeneket készített. Al Jazari, muszlim feltaláló ugyancsak emberszerű zenélő automatákat valósított meg (XII. század). 1495-ben Leonardo da Vinci (Olaszország) egy mechanikus lovag terveit készítette el. Ezek az eszközök általában egyszerű mozgássorozatok végrehajtására, az emberek szórakoztatására voltak alkalmasak. A mozgáshoz szükséges energiát a rugók, nagynyomású gőz segítségével tárolták. A mechanikus órakészítés mesterségének fejlődése lehetővé tette a finom mozgáshoz szükséges pontos mechanizmusok, áttételek kidolgozását. Fontosabb példák:

- 1738 – Elkészül Jaques de Vaucanson mechanikus kacsája, amely képes volt hápogni, enni, fürdeni. 4000-nél több alkatrészből állt.
- 1774 – Pierre Jaquet-Droz megtervezi és kivitelezi az Automatikus Írnokot. Az eszköz képes belemártani a tollat a tintába és előre beprogramozott vagy megadott, maximum 40 karaktert tartalmazó szöveget leírni.
- 1769 – Kempelen Farkas megalkotta a Török elnevezésű távvezérelt sakkozógépet.

A "robot" szó először egy Karel Kapcek használta a R.U.R. (Rossumovi Univerzální Roboti - Rossum's Universal Robots) tudományos-fantasztikus színdarabjában. A szó szláv eredetű, munkát, fáradozást jelent ("rábotá").

Az ipari robot egy, ismétlődő mozgásokat nagy pontossággal végrehajtó, különböző feladatoknak megfelelően újraprogramozható gép. Annak a feltételei, hogy a robotok alkalmazhatóak legyenek a termelési folyamatokban vagy ember számára hasznos szolgáltatásokat tudjanak elvégezni, a második világháború utánra valósulnak meg.

Az ipari robot megvalósításához szükséges volt egy általánosan programozható eszközre, a napjainkban is ismert számítógép architektúrákra. Habár az 1800-as években a szövőgépekre kifejlesztett lyukkártyás programozási technológia alkalmazható egyszerű robotprogramozási feladatokra, a korszerű számítógépek megengedték a hatékony, egyszerű leírását komplexebb mozgássorozatoknak is.

Ugyancsak feltétel volt a viszonylag kisméretű, de ugyanakkor megfelelő erőt/nyomatékot kifejteni képes elektromos és hidraulikus hajtások megjelenésére. A robotikai feladatokhoz ezeket a beavatkozókat pozíciószabályozott üzemmódban kellett használni, tehát elmozdulás vagy elfordulás érzékelővel kellett őket felszerelni. A pontos mozgássorozatok ismételt végrehajtásához különböző terhelések mellett a visszacsatolásos szabályozás elvét szükséges alkalmazni.

- Az első ipari robot tervezésének és kivitelezésének 1954-ben fogott neki George Devol és Joseph Engelberger. Ők hozták létre az első, Unimation Inc. robotikai vállalatot. Az első Unimate robotot 1961-ben helyezték üzembe a General Motors cégnél, anyagmozgatásra használták. A robot hidraulikus meghajtású volt, mágneses memóriát használtak a robotprogram tárolására.

- Az műszaki intézetek felkarolták a robotikát, mint új szakterületet, beemelték a kutatási és oktatási programjaikba. 1965-ben a Carnegie Mellon egyetemen létre jön egy Robotika Intézet. 1969-ben Victor Scheinmann, a Stanford egyetemen megalkotja a Stanford Arm nevű robotot, amely az első számítógéppel programozható, villamos meghajtású robot. 1979-ben a Yamanashi Egyetemen (Japán) létrehozzák a SCARA kart, amely napjainkban is elterjedt architektúra, kedvelt és olcsó megoldás számos robotikai feladathoz.

- Ugyancsak Victor Scheinmann tervezi meg 1975-ben a PUMA (Programable Universal Machine for Assembly) robotot, ami ugyancsak az Unimation cég terméke. Villamos hajtású, számítógéppel vezérelt robot. A fejlesztés célja olyan robot architektúra kialakítása, amely egy futószalag mellett hasonló mozgássorozatokra képes, mint egy ember.

-1977-ben a svéd ABB cég megvalósítja az IRB6 robotarchitektúrát, amely szintén villamos hajtású, számítógép által vezérelt és számos ipari robot hasonló architektúrával rendelkezik napjainkban is.

- Űrben elvégzendő mozgatási feladatokra a Canadarm 1 vagy hivatalosan (Shuttle Remote Manipulator System - SRMS) robotkart fejlesztették ki, amelyet az Amerikai űrsiklók használtak 1981-től. Az ISS Nemzetközi Űrállomás ennek a továbbfejlesztett változatát, a Canadarm 2-t (Space Station Remote Manipulator System - SSRMS) használja manipulálási feladatokra 2001-től.

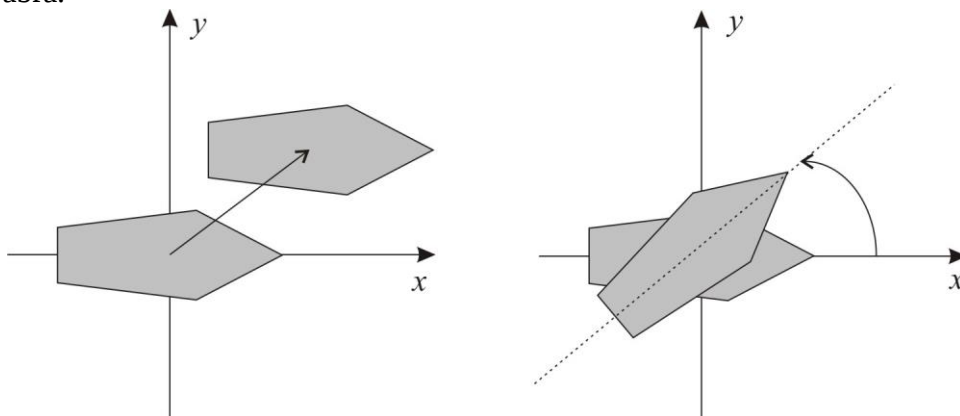
- Speciális feladatokra vezették be a KUKA Titan 1000 robotot, amely képes 1300 kg tömeget mozgatni, 0.1mm pontossággal, és kinyúlása több mint 3 méter.
- A robotkarok orvosi, sebészeti alkalmazásai is elterjedtek. A legismertebb a Vinci robotsebész rendszer, amelyet 2000-ben vezettek be és sikeresen alkalmaztak számos sebészeti beavatkozásnál.
- 2000 után egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek olyan robotokra, amelyek képesek biztonságosan egy munkatérben dolgozni az emberrel. Ezeknek a robotoknak tömege kicsi és erőérzékelőkkel vannak felszerelve a nem várt ütközések biztonságos érzékeléséhez. Közismert LWR (Light Weight Robot) termékek a KUKA LBR valamint a Universal Robotics (Dánia) cég termékei.

Robotikai alapfogalmak

A robot egy irányított mechanikai rendszer, amely az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik: újraprogramozható, előre megadott pályán képes mozogni, a pálya mentén feladatokat képes elvégezni. Mechanikai rendszer alatt itt olyan rendszereket értünk, amely erőhatás eredményeként mozgást végez, sebességet képes generálni.

Az ISO 8373 standard az ipari robot manipulátorokat az alábbi formában definiálja: automata módon irányított, újraprogramozható, többfunkciós, három vagy több tengely mentén irányított mozgást végző manipulátor, amely lehet rögzített alapú vagy mobilis és ipari automatizálásra alkalmazható.

A robotok segítségével egy célszköz térbeli pozícióját és orientációját módosíthatjuk, lásd 1. ábra.



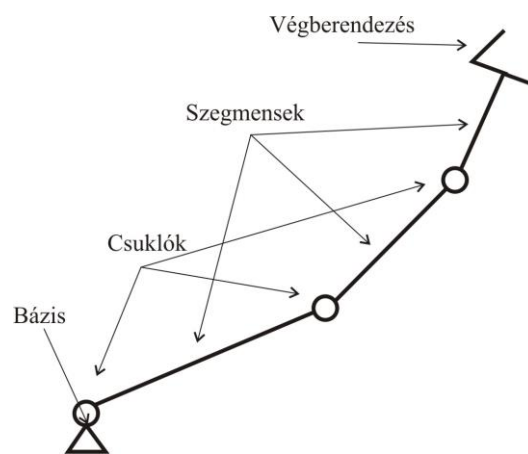
1. Ábra: Céltárgy pozíciójának és orientációjának megváltoztatása síkban

Megkülönböztetünk manipulálási és szállítási feladatokat. Manipulálás esetén a megtett út hossza összemérhető a robot méretével. Szállítási feladatok esetén a megtett út jelentősen nagyobb a robot méreténél. A manipulálási feladatokat tipikusan robotkarokkal végezzük el, a szállítási feladatokhoz mobilis robotokat alkalmazunk.

A robot manipulátorok felépítésében két részt különítünk el:

- *Végberendezés* (end-effector) a céltárgy mozgatására vagy módosítására szolgáló eszköz. A végberendezés a robot manipulátor azon része, amely kapcsolatba kerülhet a robot a környezetével. Lehet például egy megfogó (gripper) vagy megmunkáló eszköz.
- Artikulált mechanikai struktúra: a végberendezés térbeli pozícióját és orientációját módosítja előírt sebességgel (és gyorsulással) a robot által elvégzendő feladatnak megfelelően.
- A robot *bázisa* az a térbeli pont, ahol az artikulált mechanikai struktúra alapja el van helyezve a környezetében.

Az artikulált mechanizmus *szegmensek* (link) és *csuklók* (joint) sorozatából áll. A szegmenseket merev testeknek tekintjük, amelyeket csuklók kötnek össze. Kivételt képeznek ez alól azok a robotok, amelyekben a szegmensek rugalmassága nem elhanyagolható és ezt a robot irányításánál is figyelembe kell venni. A szegmensek méretei, alakja határozzák meg a robot munkaterének nagyságát.

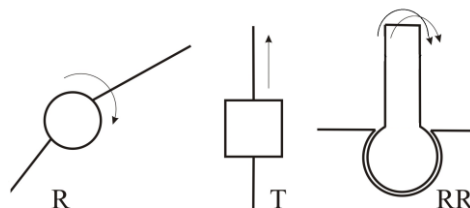


2. Ábra: Nyílt láncú robot manipulátor és részei

A *csuklók* képezik a robot manipulátor mozgó részeit, megvalósítják a szegmensek mozgatását. Több csuklótípust különböztetünk meg. A primitív csuklók csak egy tengely mentén képesek mozgatni a szegmenseket.

- A *rotációs* (R, Revolute joint) csukló a szegmenst elforgatja az előzőhöz képest egy adott tengely mentén.
- A *transzlációs* (T, Prismatic joint) csukló a szegmenst eltolja a másikhoz képest egy adott tengely mentén.

A primitív csuklók mellett alkalmazhatunk *összetett csuklókat* is a robotkar kialakításához, amelyek kettő vagy több tengely mentén képesek mozgást végezni. Ilyen például a botkormányoknál ismert gömbcsukló. Az gömbcsuklók irányított mozgásának megvalósítása, beavatkozókval való felszerelése bonyolult.



3. Ábra: Rotációs, translációs és gömbcsukló

Csuklóváltozók tere: Az a tér, amelyben leírjuk a robot csuklóinak összes lehetséges pozícióját. A robot csuklók adott pozícióját $\mathbf{q}$ vektorban tároljuk. A $\mathbf{q}$ elemei a *csuklóváltozók*. Egy rögzített $\mathbf{q}$ érték a robot egy *konfigurációját* adja. A vektor tartalmazhat szögeket és távolságokat, amelyeket egy adott referenciatengelytől illetve egy adott referenciaponthoz képest mérünk.

$$\mathbf{q} = (q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n)^T$$

A tér dimenziója (n) a robot szabadságfoka (DOF – Degree of Freedom). Amennyiben a robot manipulátor csak primitív csuklókat tartalmaz a csuklók száma megegyezik a robot szabadságfokával. Összetett csuklókat tartalmazó robot manipulátorok esetén a szabadságfok nagyobb csuklók számánál.

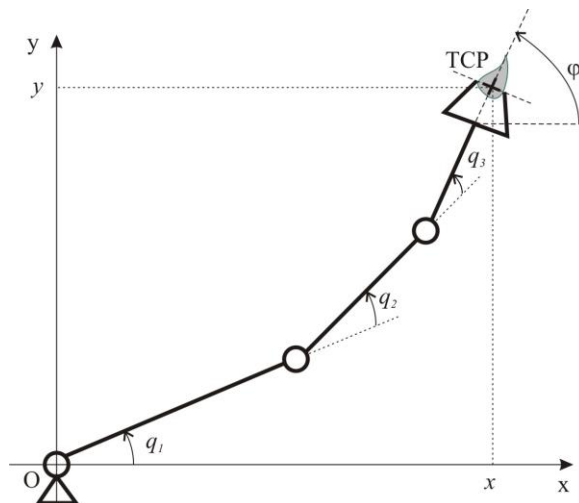
Munkatér: Az a tér, amelyben leírjuk a végberendezés összes lehetséges pozícióját. A Térbeli pozíció megadásához kiválasztjuk a végberendezés egy jellegzetes pontját, a szerszámközéppontot (TCP – Tool Center Point). Például manipulálási feladatok esetében ez lehet az a pont, ahol a megfogó összezár a céltárgyon. A szerszámközéppont *térbeli pozícióját* három koordinátával jellemezhetjük. A végberendezés *orientációját* szintén három paraméterrel (szöggel) jellemezhetjük. Megmondhatjuk például, hogy egy derékszögű referencia-koordinátarendszerhez mind a három tengelyéhez képest a végberendezéshez rögzített koordinátarendszer mennyire van elforgatva. Ennek megfelelően a munkatér maximális dimenziója hat ($m \leq 6$).

A végberendezés pozícióját leíró vektor:

$$\mathbf{x} = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_m)^T.$$

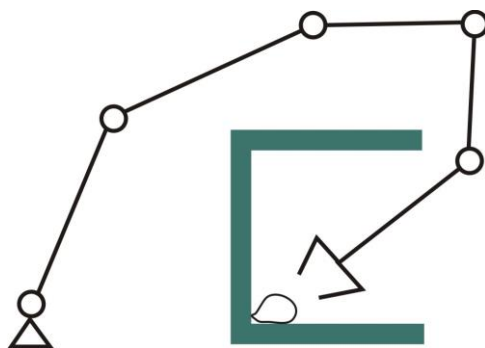
A munkatér dimenziója mindig kisebb a robot szabadságfokánál, a munkatérben egy robot nem tud több tengely mentén/körül mozgást generálni, mint ahány tengely mentén a csuklók el tudnak mozdulni ($m \leq n$).

A 4. ábrán látható robot az xOy síkban mozog. A robot három rotációs csuklóval rendelkezik, amelyek erre a síkra merőleges tengelyek körül képesek elfordulni. Ennek megfelelően a robot szabadságfoka 3, a robot konfigurációja 3 szöget tartalmaz: $\mathbf{q} = (q_1 \quad q_2 \quad q_3)^T$. A robot végberendezésének síkbeli pozícióját két koordinátával jellemezhetjük. A végberendezés orientációját (a végberendezés síkbeli elfordulását) az utolsó szegmens és az Ox tengely által bezárt szöggel jellemezhetjük. Ennek megfelelően a munkatér dimenziója is 3: $\mathbf{x} = (x \quad y \quad \varphi)^T$.



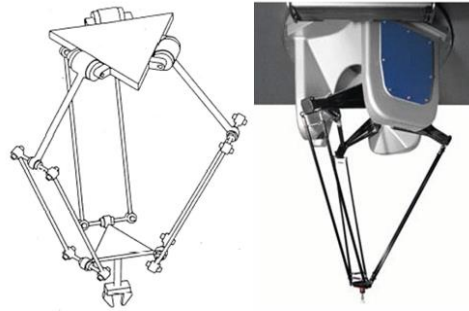
4. Ábra: Három szabadságfokú síkbeli robot konfigurációja és munkatere

Abban az esetben, amikor a munkatérben számos akadályra számíthatunk és a robot végberendezése be kell hatoljon az akadályok mögé célszerű olyan robotokat alkalmazni, amelyeknek a szabadságfoka nagyobb, mint a munkatér dimenziója. Ezeket a robotokat *redundáns* robotoknak nevezzük. Redundáns robotok esetében $n > m$ vagyis a csuklózható terének a dimenziója nagyobb, mint a munkatér dimenziója. Az alábbi ábrán egy síkban (a munkatér dimenziója 3) dolgozó redundáns robotot látunk, amelynek a szabadságfoka 5.



5. Ábra: Redundáns robot manipulátor

A robot manipulátort alkotó artikulált mechanizmus lehet nyílt láncú vagy zárt láncú. A *nyílt láncú* (soros) robotok esetén a robot bázisát a végberendezéssel egy csukló-szegmens-csukló-szegmens-csukló- ... sor köti össze. A zárt láncú robotok között a *párhuzamos robot manipulátorok* elterjedtebbek. Ebben az esetben a végberendezéshez több csukló csatolódik direkt módon. Ezt a robot típust a pontosságuk, merevségük és nagyobb teherbírásuk miatt kedveltek ipari alkalmazásokban. Ugyanakkor a párhuzamos robot munkatere általában kisebb, mint egy méretű azonos méretű nyílt láncú roboté.



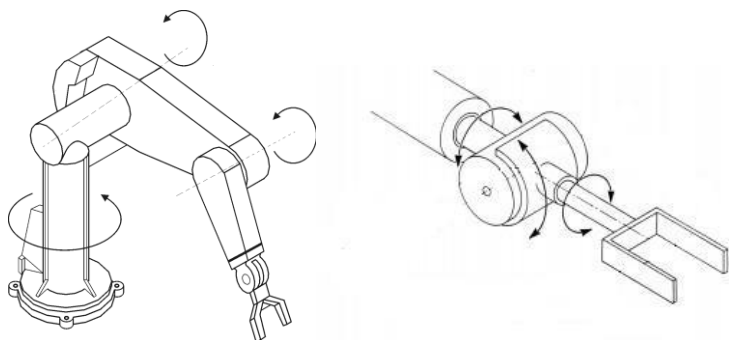
6. Ábra: Párhuzamos robot manipulátor

Ipari robotok, robotok jellemzői

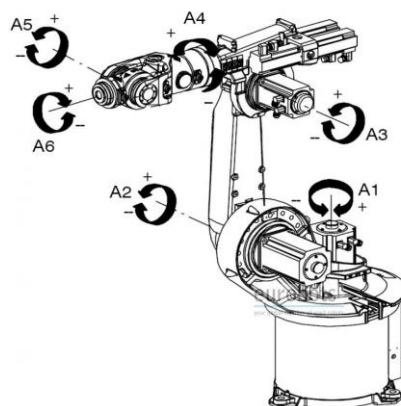
Robot architektúrák: Egy soros robot manipulátorban rotációs (R) és translációs (T) csuklók sorozatából követi egymást. A robot szabadságfokát, felépítését, mechanikai méretezését mindig a robotok által elvégzendő feladatok szabják meg.

A legelterjedtebb kialakítás a 6 szabadságfok robot manipulátor. Ebben az esetben a szabadságfokok száma egyenlő a munkatér maximális dimenziójával, tehát a végberendezését a robot a munkaterén belül bármely kívánt pozícióba előírt orientációval el tudja juttatni. Általában az első három szabadságfok felelős a végberendezésnek az előírt pozícióba történő eljuttatásáért. Ennek megfelelően az első három szabadságfokhoz tartozó szegmensek tipikusan nagyobb méretűek a minél távolabbi térbeli pozíció eléréséhez. Az utolsó három szabadságfok felelős a végberendezés orientációjának beállításáért, a végberendezés forgatásáért. Ilyen típusú architektúráknál a robot első három szabadságfokához tartozó részét *robotkarnak* (robot arm), az orientációt megvalósító három szabadságfokhoz tartozó részt *robotcsuklónak* (robot wrist) nevezzük. A legelterjedtebb korszerű robot manipulátorokban mind a hat szabadságfokot rotációs csuklókkal van megvalósítva (RRRRRR). A csak rotációs csuklókkal kialakított robotkarokat *artikulált* robotoknak nevezzük. Az ilyen típusú robotokból az első sikeres megvalósítás a PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) robot volt. A 8. ábra a PUMA robotkart és külön a PUMA robotcsuklót mutatja.

A napjainkban alkalmazott ipari robot architektúrák többségének is ehhez hasonló a felépítése, lásd például a 9. ábrán látható napjainkban elterjedt KUKA KR architektúrát. Bizonyos alkalmazások esetében nem szükséges mind a hat szabadságfok, a feladat egyszerűbb architektúrájú robottal is megoldható. Például manipulációs feladatok esetében, ha a mozgatott tárgy mindig hengerszimmetrikus (bizonyos hegesztési feladatok) elég 5 szabadságfok. Az egyszerűbb kialakítás miatt a robotok előállítási költsége is alacsonyabb.

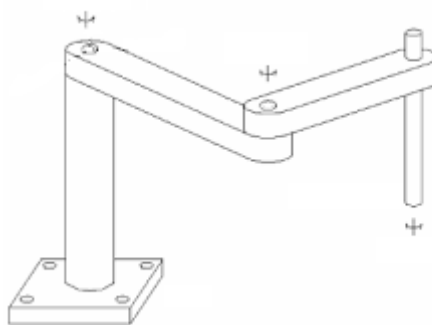


8. Ábra: PUMA kar és PUMA csukló



9. Ábra: KUKA KR típusú robot

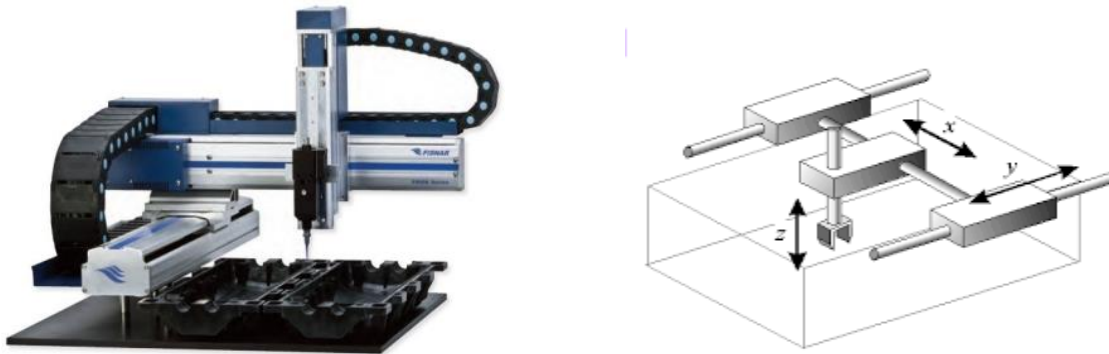
A legismertebb négy-szabadságfokú robot a SCARA (Selective Compliant Robot for Assembly) robot. A végberendezés térbeli pozicionálását két rotációs és egy transzlációs csuklóval oldja meg. Ezen felül az utolsó rotációs csukló a transzlációs tengely körüli orientációt biztosítja. A SCARA architektúra RRTR.



10. Ábra: SCARA típusú robot

Egyszerűbb feladatok esetén ugyancsak alkalmazhattuk derékszögű (Kartézián) robotot. Ez a robottípus a végberendezés pozicionálását három transzlációs csuklóval oldja meg, mind a három szabadságfok a derékszögű koordináta-rendszer egy-egy tengelye mentén

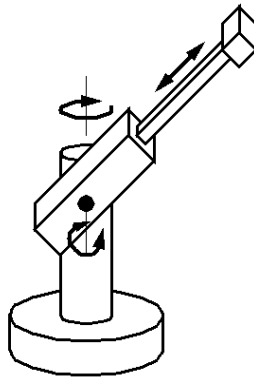
mozgatja a végberendezést. A robot architektúrája: TTT. Ez kibővíthető extra robotcsuklóval a végberendezés kívánt orientációjának biztosítására.



11. Ábra: Kartezián típusú robotkar

A szférikus robotkar a RRT típusú. Ehhez a robottípushoz tartozik a Stanford kar is, amely az első iparban is alkalmazott robottípusok közé tartozik, lásd 12. ábra.

Az ipari robotok alkalmazási területei: Napjainkban kijelenthető, hogy az ipari robotok legjelentősebb használója az autóipar. Ezen belül kiemelkedő a robotok alkalmazása *hegesztési* feladatokra. Ugyancsak jelentős felhasználása a robotoknak az *anyagmozgatás* (palettázás, céltárgyak elhelyezése a megmunkáló berendezésbe, csomagolás, stb.). A harmadik jelentős feladatkör a *megmunkálási* feladatkör (fúrás, csiszolás, festékszórás, ragasztás, vágás, csavarozás, áramkör beültetés stb.).



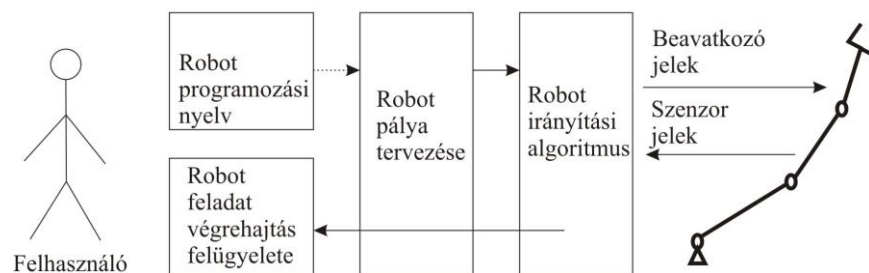
12. Ábra: Szférikus robotkar

A legismertebb ipari robot manipulátorokat gyártók közé tartozik a német *KUKA Robotics* valamint a svéd-svájci *ABB* cég. Ugyancsak jelentős piaci részesedéssel bír a *Stäubli* cég. A japán robotipar kiemelkedő képviselője a *FANUC*. Az ugyancsak japán érdekeltsgű az Amerikai Egyesült Államokban működő robotgyártó cég, a *Yakasawa Motoman*.

Robotirányítási rendszer: magába foglalja a robotot, a robot beavatkozóinak a vezérlését végző a robot irányítószoftverét, számítástechnikai eszközt, amin az irányítási

szoftver fut, valamint a számítástechnikai eszközt és a robotot összekapcsoló vezérlőberendezést. Ez utóbbi felelős a robot beavatkozójának meghajtásáért valamint a robot érzékelői jeleinek elő-feldolgozásáért.

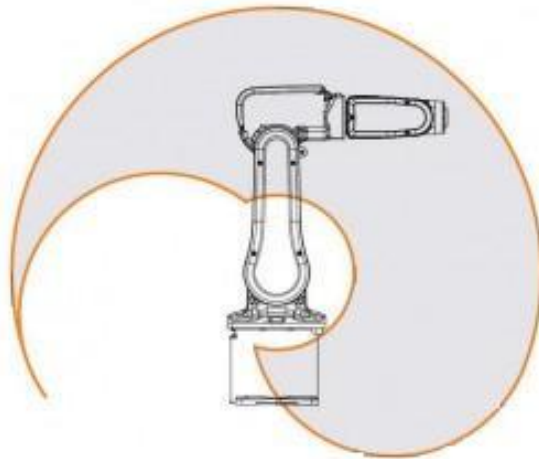
A robotot irányító szoftver tipikusan tartalmaz egy kommunikációs interfészt a felhasználó fele. A felhasználó legtöbbször egy *robotprogramozási nyelv* segítségével írja le a robotnak az előírt feladatot. A robotirányító szoftver értelmezi a feladatot és meghatározza a robot előírt mozgását (*pályatervezés*). Az előírt mozgás alapján ugyancsak a robotirányító szoftver határozza meg a robot beavatkozójának a vezérlőjeleit (*alacsony szintű irányítás*). Az elvégzendő feladatnak megfelelő robot program megírása tipikusan off-line módon történik, vagyis a feladat-végrehajtás előtt. Az alacsony szintű irányítás on-line módon fut, vagyis a feladat-végrehajtás közben. A felhasználó irányíthatja a robotot on-line módon is, például erre a célra alkalmas botkormány segítségével. Ebben az esetben távvezérlésről beszélünk.



7. Ábra: Robotirányítási rendszer

A robotok jellemzői: Az ipari robotok jellemzői szabványokban vannak rögzítve (ISO 9946, ISO 9283). A szabványok leírják azokat a jellemzőket, amelyeket a robotgyártó meg kell adjon az ipari robot katalógusában. Ezek a jellemzők alapján a felhasználó meg tudja választani az alkalmazásához szükséges robot típust. Néhány fontos, az irányításhoz kapcsolódó jellemző:

1. *Munkatér (workspace)*: az a tér, amelyben a robot végberendezése mozog. A munkatér mérete függ a robot szabadságfokától, a robot alakjától, méretétől. Ugyankor függ a csuklóváltozók határértékeitől. A munkatérhez köthető a *maximális elérés (maximum reach)* fogalma, ami a robot bázisától vízszintesen mérve a legnagyobb távolság, ameddig a végberendezés még elér.



13. Ábra: Egy ipari robot munkatere

2. *Hasznos tömeg (payload)*: a robot végberendezése által mozgatott céltárgy vagy szerszám maximális megengedett tömege.

3. *Felbontás (resolution)*: A legkisebb távolság vagy szög, amit a robot végberendezése vagy egy csukló képes megtenni.

4. *Pozícionálási pontosság (position accuracy)*: A robot több kiindulópontból megközelíti egy előírt célpozíciót. A mozgás megvalósításához az összes csukló kell mozogjon. A pozícionálási pontosságot úgy definiáljuk, mint az átlagos megérkezési pozíció és a célpozíció közötti távolság.

5. *Pozíció ismételhetőség (position repeatability)*: A robot több kiindulópontból megközelít egy előírt célpozíciót. A mozgás megvalósításához az összes csukló kell mozogjon. A pozíciópontosságot úgy definiáljuk, mint az átlagos megérkezési pozíció és a legtávolabbi megérkezési pozíció közötti távolság.

Ipari robotok esetében az ismételhetőség és pontosság tipikusan 0.1 - 0.01 mm tartományban van. Bizonyos robotok esetében megadják a pontosságot és az ismételhetőséget lineáris pálya mentén történő mozgás esetében is (*linear path accuracy, linear path repeatability*). Más fontos jellemző még a csuklók által elérhető *maximális sebesség*.

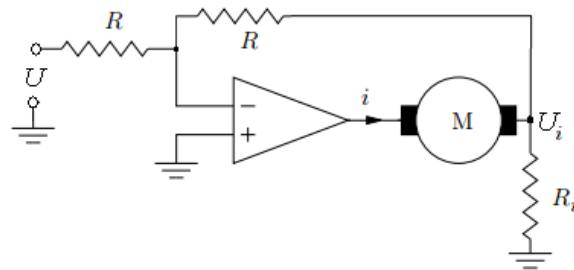
Robotokban használt érzékelők és beavatkozók

Beavatkozók: A robotcsuklók mozgásának generálására legtöbb esetben *egyenáramú villamos motorokat* alkalmazunk. A robot csuklójába, mint mechanikai rendszerbe a bemenet a nyomaték (rotációs csukló) vagy erő (transzlációs csukló).

A robotoknál alkalmazott egyenáramú motorok esetében a kifejtett nyomaték (τ) arányos a motorárammal (i):

$$\tau_M = c_2 i,$$

ahol c_2 a motor nyomatékállandója. Tehát ahhoz, hogy a motor előírt τ_M nyomatékot kifejtсен, azt kell biztosítsuk, hogy a motoron átfolyó áram τ_M / c_2 legyen. Ehhez áramszabályozási hurokot alkalmazhatunk a motor vezérlésénél. Egy tipikus proporcionális áramszabályozási hurok elvi rajza kisteljesítményű motorokra a 14. ábrán látható. A gyakorlatban a művelet erősítő és a motor között még szükség van egy áramerősítő fokozatra.



14. Ábra: Áramszabályozott egyenáramú motor

Figyelembe véve, hogy a műveleti erősítőknek nagy impedanciájú bemenete van, felírható, hogy

$$\frac{U}{R} = \frac{U_i}{R}$$

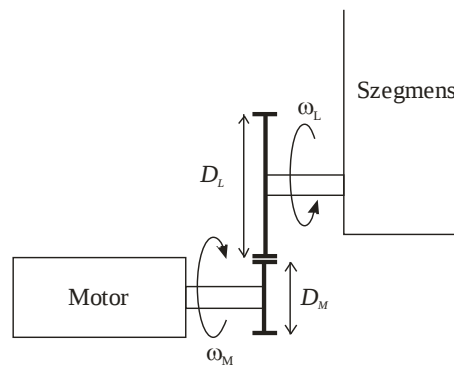
Az R_i árammérő ellenállás értéke jóval kisebb, mint a negatív visszacsatoló ágban alkalmazott R ellenállásérték ($R_i \ll R$). Ennek megfelelően a motoráram:

$$i = \frac{U_i}{R_i}$$

Tehát ahhoz, hogy a motor egy előírt τ_M nyomatékot kifejtсен, a szabályozó U feszültségbemenetét az alábbi módon kell számítsuk:

$$U = \frac{R_i}{c_2} \tau_M$$

Általában a motor illesztése a robotszegmenshez egy áttételen keresztül történik. Rotációs csuklók esetén az áttétel korszerű robotokban hullámhajtómű vagy bolygóhajtómű. Amennyiben transzlációs csuklót akarunk villamos motorral megvalósítani, fogaslécra vagy golyósorsóra van szükségünk. Az áttétel a robotkarokban a sebességet leosztja. Két fogaskerékből álló egyszerű áttétel az alábbi ábrán látható.



15. Ábra: Motor-szegmens illesztése fogaskerék áttétellel

Amennyiben a fogaskerek átmérői D_M és D_L az áttétel értéke:

$$N = \frac{D_L}{D_M}$$

Az alkalmazott leosztás robotkaroknál tipikusan 10-100 nagyságrendű. Ha a motoroldalon a szögsebesség ω_M akkor a szegmens oldalán a szögsebesség:

$$\omega_L = \frac{\omega_M}{N}$$

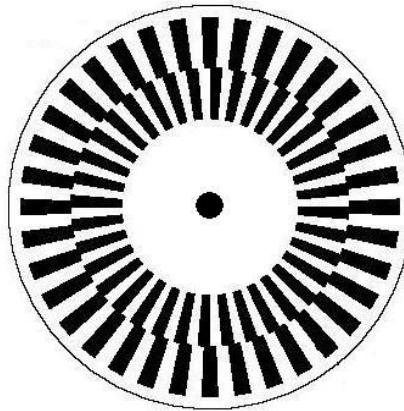
A nyomaték a szegmens oldalon felszorzódik a motoroldalhoz képest. Ugyanakkor figyelembe kell venni az áttételben és a motor felfüggesztésénél fellépő súrlódási hatásokat is. Ha a súrlódás miatti veszteségnek megfelelő nyomaték τ_f , akkor a szegmens oldalán a kapott nyomaték:

$$\tau_L = N\tau_M - \tau_f$$

Főleg transzlációs csuklók esetében villamos motorok helyett alkalmazhatunk *hidraulikus beavatkozókat* (hidraulikus hengereket). Előnyük, hogy nagyobb erőt képesek kifejteni, mint a hasonló méretű villamos motorok. Hátrányuk, hogy a működtetésükhöz nagynyomású pompával szükséges biztosítani a hidraulikus folyadék nyomását.

Érzékelők: A robotikai rendszerekben a csuklók pozícióját és sebességét sok esetben *inkrementális adóval* mérjük. Az inkrementális adók relatív szögelfordulás és szögsebesség mérésre alkalmas szenzorok. A egységnyi idő alatt a tengelyük elfordulásával arányos számú impulzust szolgáltatnak. Az impulzusokat az érzékelő

tengelyére rögzített, ablakokat tartalmazó tárcsa és egy fotóemitter- fotódetektor pár segítségével állítják elő, lásd 16. ábra. Az érzékelő tengelyét csatoljuk a csuklót mozgató motor tengelyére. Ha a motor sebessége megváltozik az impulzussorozat frekvenciája nő meg. Így az inkrementális adóval megvalósított pozíciómérés impulzusszámlálásra, a sebességmérés frekvenciamérésre vezethető vissza. Az inkrementális adó jellemzője a felbontása, ezt a tárcsán levő ablakok száma adja. Nagyságrendje robotikai rendszereknél tipikusan 1000-10000.



16 Ábra: Inkrementális adó tárcsája

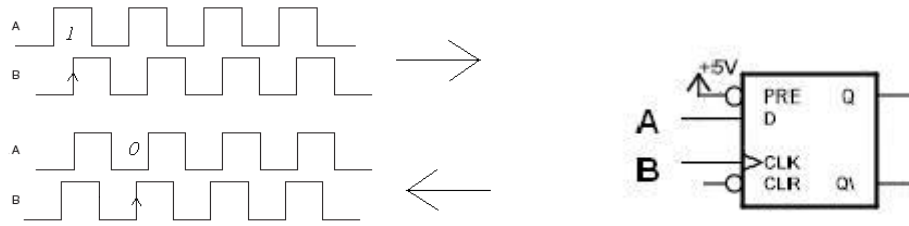
Szögsebesség mérése: Feltételezzük, hogy az inkrementális adó felbontása N , vagyis az inkrementális adó 2π radián elfordulás alatt N impulzust ad. A sebességméréshez ismert T időegység alatt beérkezett impulzusok számát határozzuk meg. Feltételezzük, hogy ΔT idő alatt n impulzus érkezett be, ami $\Delta\alpha$ elfordulásnak felel meg. Ebben az esetben a szögsebesség:

$$\omega_M = \frac{\Delta\alpha}{\Delta T} = \frac{2\pi n}{N\Delta T} = \frac{2\pi f}{N} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

ahol $f=n/\Delta T$ az inkrementális adótól kapott jel frekvenciája. Tehát a szögsebesség arányos a frekvenciával.

A frekvencia alapú szögsebesség méréssel nem határozható meg a forgás iránya. Az irány meghatározására az inkrementális adó két fotóemitter - fotódetektor párt tartalmaz. A párokhoz tartozó ablakok a tárcsán egymáshoz képest el vannak tolva, lásd 16. Ábra. Ennek megfelelően két, egymással fázisban eltolt impulzussorozatot kapunk (A, B). Az irány meghatározásához azt használhatjuk ki, hogy amikor az inkrementális adó tárcsája pozitív irányba forog ($\rightarrow$), a B csatorna pozitív frontján az A csatorna értéke 1. Ha az inkrementális adó tárcsája negatív irányba forog ($\leftarrow$), a B csatorna pozitív frontján az A csatorna értéke 0. Egy D bistabillal az irányt meghatározhatjuk. A CLK bemenetre az A csatornát a D bemenetre a B csatornát kötjük (vagy fordítva). Ha a CLK bemeneten

pozitív front van, a bistabil a D bemenetet kiírja a Q kimenetre. Tehát pozitív irány esetén a $Q=0$, negatív irány esetén a $Q=1$ lesz.



17. Ábra: Forgásirány meghatározása inkrementális adóval

A relatív *szögelfordulást* ($\theta[k]$) a sebesség integráljaként kapjuk. A numerikus integráláshoz a trapéz módszert alkalmazhatjuk:

$$\theta[k] = \theta[k-1] + \frac{(\omega_M[k] + \omega_M[k-1])\Delta T}{2} \text{ [rad]}$$

Az inkrementális adó mindig csak az előző pozícióhoz képest mondja meg az elfordulás mértékét. Ennek megfelelően a pozíciómérést "nullázni" kell. Ennek során a csuklókat eljuttatjuk egy olyan kezdeti pozícióba, amelyet ismerünk, és itt beállítjuk a $\theta[0]$ kezdőpozíciót. Az inkrementális adó jelét feldolgozó mérőegység a szögelfordulást mindig ettől a kezdőpozíciótól számolja. Egy robot inkrementális adóinak nullázása a robot üzembe helyezésénél, kalibrációjánál történik.

Az inkrementális adók helyett alkalmazhatunk abszolút enkódereket vagy rezisztív szögelfordulás mérőket, amelyek nem relatív, hanem abszolút szögelfordulást mérnek.

A szögelfordulás, szögsebesség mérés mellett még szükség van még a motoráram szabályozási hurok kialakításához áramérzékelőkre. Kis teljesítményű motor esetén elégséges mérőellenállás alkalmazása. A hidraulikus beavatkozókcal kialakított robotmeghajtás esetén célszerű nyomásérzékelőket használni a hidraulikus hengerben fellépő nyomáskülönbség mérésére. Az erőirányítási módszerek hatékony megvalósítására a robot végberendezését és a csuklókat erő- és nyomatékérzékelőkkel kell felszerelni.