

# ROBOTTECHNIKA I.



**SZÉCHENYI TERV**

A projekt címe: „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés”

A megvalósítás érdekében létrehozott konzorcium résztvevői:



[KECSKEMÉTI FŐISKOLA](#)

[BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM](#)

[AIPA ALFÖLDI IPARFEJLESZTÉSI NONPROFIT KÖZHASZNÚ KFT.](#)

Fővállalkozó: [TELVICE KFT.](#)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Írta:

**KULCSÁR BÉLA**

Lektorálta:

**FILEMON JÓZSEFNÉ**

# **ROBOTTECHNIKA I.**

**Egyetemi tananyag**



**2012**

COPYRIGHT: © 2012-2017, Dr. Kulcsár Béla, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

LEKTORÁLTA: Dr. Filemon Józsefné

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)

A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

ISBN 978-963-279-625-3

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](http://www.typotexkiado.hu) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2.A/2-10/1-2010-0018 számú, „Egységesített jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés” című projekt keretében.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség  
www.ujszchenyiterv.gov.hu  
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

KULCSSZAVAK:

Robot fogalma, helyezőberendezés, manipulátor, teleoperátor, programszelekció, programadaptáció, robot munkatér, robotmechanika, robtohajtási rendszerek, szenzorikai rendszerek, tömegkiegyenlítési rendszerek, robotdinamika, inverz és direkt feladat, robotirányítás, koordináta transzformációk, Denavit–Hartenberg-transzformáció, robotprogramozás, orvostechnikai robotok, robotvizsgálat, robotalkalmazás.

ÖSSZEFOGLALÁS:

A *robottechnika* a műszaki tudományterület egyre szélesebb gyakorlati jelentőséggel bíró ága, amely több ponton kapcsolódik más tudományágakhoz, pl. a matematikához és az informatikához. Mint eszközrendszer a termelési folyamatok automatizálására fejlődött ki. Létrejöttét a fejlett ipari államok ipari termelés volumenének növekedését akadályozó munkaerő gondok, a termelékenység növelésének igénye, a minőségre való fokozott törekvés, az egészségre ártalmas és veszélyes munkahelyeken az emberi munka kiváltására irányuló szociális igények segítették elő. A könyv a fent körvonalazott feladatoknak és követelményeknek megfelelő robottechnikai ismereteket foglalja össze. Áttekinti a robotok kialakulását, a robotok kialakulásának tudományos műszaki és társadalmi hátterét, a robotok fogalmi meghatározását, a robotok felépítését, a robotok irányító rendszerét, a robotok programozását, a robotok alkalmazását és a robotok vizsgálatát. Tartalmi felépítését tekintve tankönyvnek készült, de a robotalkalmazás és robotüzemeltetés, illetve a kutatás-fejlesztés területén dolgozó mérnökök hasznos elméleti és gyakorlati ismereteket találnak benne. A könyv tartalmi strukturálódása a deduktív elvet követi, így BSc alapképzésben és MSc mesterképzésben részt vevő hallgatók is elegendő mélységű ismeretanyagot sajátíthatnak el.

## TARTALOM

BEVEZETÉS .....	7
1. A ROBOTOK KIALAKULÁSÁNAK ÁTTEKINTÉSE .....	9
2. A ROBOTOK KIALAKULÁSÁNAK TUDOMÁNYOS, MŰSZAKI ÉS TÁRSADALMI HÁTTERE (Háttéranyag).....	19
3. ROBOTOK FOGALMI MEGHATÁROZÁSA .....	23
3.1. Robotok funkcionális elemzése .....	25
3.1.1. Manipulátor .....	26
3.1.2. Teleoperátor.....	28
3.1.3. Helyező berendezés .....	30
3.1.4. Ipari robotok .....	31
3.2. Robotok csoportosítása.....	34
3.3. Ellenőrző kérdések .....	35
4. ROBOTOK FELÉPÍTÉSE .....	38
4.1. Robotok mechanikai rendszerének koordinátarendszerek szerinti felépítése, robotmechanikák .....	38
4.1.1. Derékszögű koordinátarendszerű robot.....	38
4.1.2. Henger koordinátarendszerű robot (RTT).....	41
4.1.3. Gömbi koordinátarendszerű robot (RRT) .....	43
4.1.4. Csuklóskaros robotok.....	45
4.1.5. Robotplatformok lineáris (transzlációs) mozgásokból.....	57
4.1.6. A robottechnika mechanizmuselméleti kérdései .....	62
4.2. Robotok munkatere .....	73
4.3. Robotkarok tömegkiegyenlítő rendszerei .....	103
4.3.1. Ellensúllyal való tömegkiegyenlítés.....	104
4.3.2. Rugós tömegkiegyenlítő mechanizmus.....	110
4.4. Robotok hajtási rendszerei .....	120
4.4.1. Pneumatikus hajtási rendszerek.....	121
4.4.2. Hidraulikus hajtási rendszerek .....	125
4.4.3. Villamos hajtási rendszerek.....	131
4.5. Robotok megfogó szerkezetei .....	149
4.5.1. Erőzáró megfogás.....	151
4.5.2. Alakzáró megfogás.....	155

4.5.3. Robotmozgás dinamikai jelenségei és a megfogó szerkezet megfogási biztonsága.....	159
4.5.4. A megfogandó munkadarabok méretének hatása a megfogó szerszámközéppontjának helyzetére.....	167
4.5.5. Egyéb megfogó szerkezetek.....	180
4.6. Robotok szenzorikai elemei .....	181
4.6.1. Belső szenzorok .....	183
4.6.2. Külső szenzorok .....	192
4.7. Mobil robotok felépítése és jellemzői .....	193
4.8. Ellenőrző kérdések .....	201
IRODALOMJEGYZÉK.....	203

## BEVEZETÉS

Az 1970-es években tűnt fel és hamarosan önálló tudományterületté vált a *robottechnika*. A műszaki tudománynak e tudományterület egyre szélesebb gyakorlati jelentőséggel bíró ága, amely több ponton kapcsolódik más tudományágakhoz, pl. a matematikához és az informatikához. A robottechnika, mint eszközrendszer a termelési folyamatok automatizálására fejlődött ki. Létrejöttét elősegítették a fejlett ipari államok ipari termelés volumenének növekedését akadályozó munkaerő gondok, a termelékenység növelésének igénye, a minőségre való fokozott törekvés, az egészségre ártalmas és veszélyes munkahelyeken az emberi munka kiváltására irányuló szociális igények.

A könyv a fent körvonalazott feladatoknak és követelményeknek megfelelő robottechnikai ismereteket foglalja össze. Tartalmi felépítését tekintve tananyagnak készült, de haszonnal használhatják azok a mérnökök, akik a robotalkalmazás és robotüzemeltetés, illetve a fejlesztés területén dolgoznak. A könyv tartalmi strukturálódása a deduktív elvet követi, így BSc alapképzésben és az MSc mesterképzésben részt vevő hallgatók is elegendő mélységű ismeretanyagot sajátíthatnak el.

A könyv két kötetbe szerkesztett. Az első kötet a bevezetésen kívül négy fejezetre tagozódik. Az első fejezet a robotok kialakulását tekinti át. A második fejezet a robotok ki-alakulásának tudományos műszaki és társadalmi hátterét elemzi. A harmadik *robotok fogalmi meghatározása* fejezet a robotok funkcionális elemzését és csoportosítását ismerteti.

A *robotok felépítése* fejezet a robot, mint mechanikai szerkezet felépítését, kinematikai, dinamikai és hajtástechnikai jellemzőit elemzi.

A második kötet szintén négy fejezetet foglal magába. A *robotok irányító rendszere* fejezet a robotok belső adatfeldolgozásának leképezését tárgyalja a programozott pálya adatoktól a csukló-mozgatás szögelfordulás adatainak realizálásához, figyelembe véve a nyomaték-képzést és a hajtásszabályozást, illetve a perifériák működését és más irányító rendszerhez való illesztését. A *robotok programozása* fejezet azokat a programozás-technikai módszereket ismerteti, amelyek segítségével a robot által befutandó pálya adatok előállíthatók.

A *robotok alkalmazása* fejezet a robotok ipari alkalmazásának jellegzetességeit ismerteti. A *robotok vizsgálata* fejezet azokat a vizsgálati módszereket és eszközöket foglalja össze, amelyek segítségével a robotok minősíthetők és üzemeltetésük meghatározott feltételek mellett biztosítható.

A könyv anyagának alapját a Budapesti Műszaki Egyetemen "*Robotok és vizsgálatuk*" címmel tartott előadásaim, illetve e téren végzett kutatásaim képezik. Az előadások időterjedelme sok lényeges elméleti és gyakorlati tananyagrészt tárgyalását nem tette lehetővé, azóta olyan új kutatási és fejlesztési eredmények születtek és kerültek nyilvánosságra, amelyek ismeretét a 21. század mérnöke nem nélkülözheti.

Szeretnék köszönetet mondani azon kollégáknak, akik biztattak a könyv megírására, tanácsaikkal és érdeklődésükkel segítették munkámat. Köszönettel tartozom a könyv bírálójának lelkiismeretes munkájáért és hasznos tanácsaiért.

Kívánom, hogy a hallgatóság és a gyakorlatban dolgozó mérnökök haszonnal forgassák a könyvet.

Budapest, 2011. március

Dr. Kulcsár Béla



## 1. A ROBOTOK KIALAKULÁSÁNAK ÁTTEKINTÉSE

A történelemben és az irodalomban újra és újra felbukkantak olyan személyiségek, akik az embert meg akarták alkotni. Ie. I. sz.: *Heron* az "Automata színház" c. munkájában leírja egy mechanikus színház modelljét, amelyben kizárólag fogaskerekekkel, emelőkarokkal és csigákkal mozgatott bábuk szerepelnek. Az öt felvonásos színdarab a trójai egy epizódját eleveníti fel; miként állt bosszút *Naupliosz* a görögökön, akik megkövezték fiát *Palamédészt*. Ugyancsak ie. I. szd. –ban Homéros az *Ilias*-ban írt arról, hogyan igyekeztek az istenek képmást teremteni maguknak. Az emberutánzatok legismertebb példája Paracelsus (1493-1541) *Homunculus*-a. A humunculus a középkori alkimisták tanítása szerint, tisztán kémiai eljárással, laboratóriumban előállítható mesterséges ember. *Liwa ben Bezalcel* (1552 – 1612) prágai rabbi megalkotja a *GÓLEM* –et, amely nem más, mint egy agyagból, vízhordásra és favágásra gyúrt szolga 1.1. ábra. A Gólemet úgy keltették életre, hogy egy kabbalisztikus varázsszavakkal teleírt pergamen lapot tettek a szájába. A példák sorát zárjuk most Mary Shelley *Frankenstein*-jével (1818).



1.1. ábra

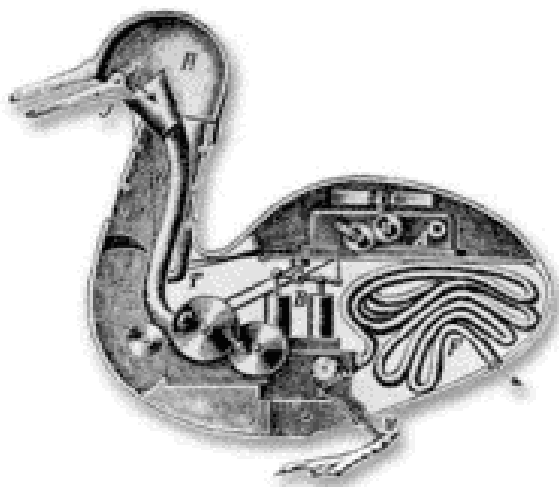
A mesterséges lényekhez kapcsolódó történetek gyakran ijesztő véget érnek, az ember kiszolgáltatottjává lesz saját teremtményének. Ezek a gondolatok mindennaposak a mai utópikus és fantasztikus filmekben is

Az emberi intelligencia mesterséges létrehozásának ötlete a technika világában kevésbé járatos emberekben ijedséget, félelmet vált ki. Horror- és utópiafilmek valóságosként ábrázolnak olyan emberszabású robotokat (androidokat), amelyek önálló gondolkodásuk és cselekvésük révén az emberek felett állnak. Szörnyeket, akik a világot uralják és az embert szolgáskorban tartják, nem utolsó sorban azért, mert a természet, vagy más felső hatalom így fizet vissza az elkövetett vétkekért.

A technika mai állását tekintve, még igen messze vagyunk ilyen teremtmények létrehozásának lehetőségétől. Van azonban néhány olyan kérdés, amely már ma is gondolkodásra késztet: képes-e a mesterségesen előállított intelligencia a munkafolyamatokban az embert helyettesíteni.

Már a 17. és 18. században is voltak olyan ezermesterek, akik nem az ember lényét akarták lemásolni, hanem olyan - külsejében emberhez hasonló - szerkezetet készítettek, amely az ember mindennapi munkáját megkönnyítette.

A 18. században két igen híres automata készült. 1700-ban Párizsban Jacques de Vaucanson először megépített egy zenélő mechanikus babát. A baba egy ember nagyságú fuvolajátékos, ami a fuvolát szájához tartva, fújta és ujjjaival meghatározott sorrendben váltogatta a hangszer billentyűit, és 11 különböző melódiát tudott eljátszani. 1738-ban készült el a második híres automataként a hápogó kacsa 1.2. ábra, amely meglehetősen változatos mozgásokra volt képes. Nemcsak hápogott és dülöngélve lépegetett, hanem úszkált és lubickolt is a vízben. Továbbá ivott a vízből, szemeket csipegetett és szimulálni is tudta az emésztés végtermékét, bűzös golyók kibocsátásával.



1.2. ábra

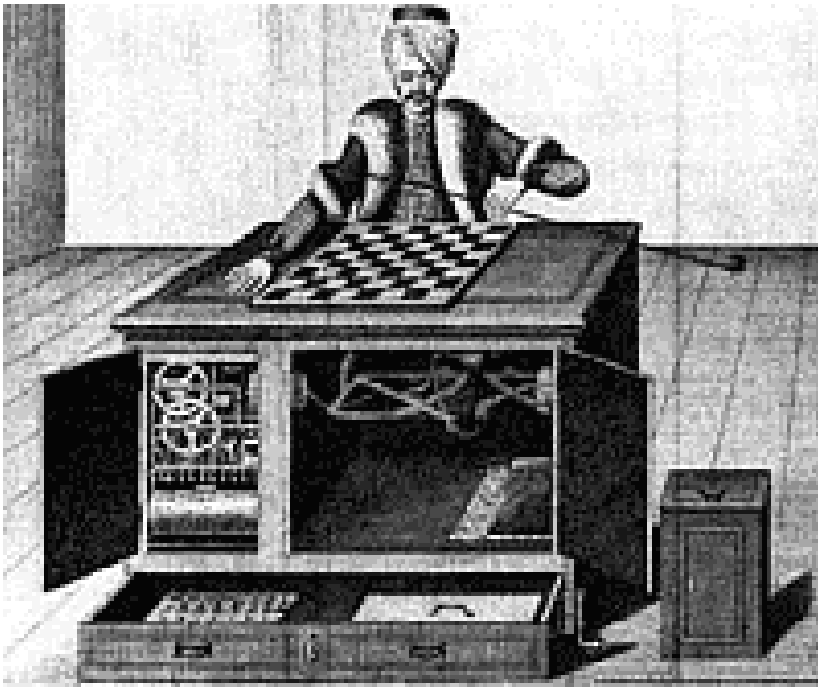
Pierre Jaquet-Droz svájci órás, 1772-ben alkotta meg az "író"-t. Ez egy fiú alak volt, amely tollat tintába mártva René Descartes híres mondatát vetette papírra: "Gondolkodom, tehát vagyok" (1.3. ábra). Az automata a hátán elhelyezett tárcsa segítségével 40 karakternél nem hosszabb szövegekre volt programozható. A mester a következő két évben megalkotta az "író" párját, a "tervező"-t, amely cserélhető bűtykök segítségével különböző rajzokat tudott készíteni. Bár nem kapott az előző kettőhöz hasonló publicitást, itt kell megemlíteni a magyar Kempelen Farkas udvari tanácsos sakk-automatáját.



1.3. ábra

Kempelen Farkas valószínű, hogy a késő barokk kor embereinek az órákért és a felhúzható állat- és babafigurákért való lelkesedését használta ki. Maga a sakk-automata egy töröknek öltöztetett baba, amely keresztbe rakott lábakkal ül egy doboz formájú asztal előtt, amelyen a sakktábla, rajta a sakkfigurákkal, helyezkedik el. A mozgásokat bonyolult kerékhajtások és rudak továbbították, amelyet az asztal zárt rekeszében megbújó igazi sakkjátékos működtetett. Valójában tehát nem a gép játszott, de akkor ilyen szerkezet

építése nagy műszaki teljesítménynek számított. A gép leírását Kempelen 1791-ben tette közzé – 1.4. ábra.



1.4. ábra

Az automaták építése a 19. században is folytatódott. Ezek közé tartozik az 1805-ben H. Millardet által konstruált képet festő mechanikus baba. Emberformája volt a George Moore "szaladó mozdony"-ának is, amelyet 1893-ban Amerikában épített meg. A belsejében elhelyezett gőzgép mozgatta a lábakat, járása mintegy kétszer olyan gyors volt, mint az átlag-emberé.

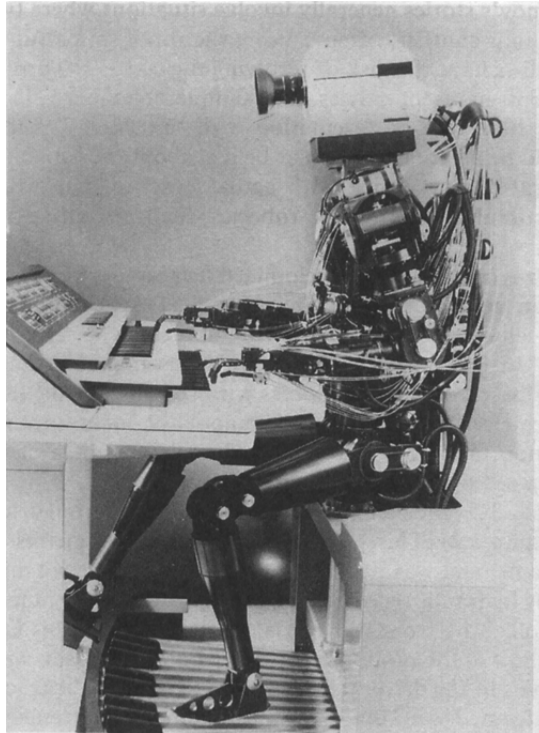
Láthatjuk tehát, hogy a robotok előfutárai már régen meg voltak, csak korábban nem sikerült a már megépített gépeket hasznos dolgokra alkalmazni. A tervezés tovább folyt, ha már sikerült egyes élőlények mozgását gépekkel megvalósítani, miért ne sikerülhetve ezeket az emberi manuális tevékenységek kiváltására felhasználni.

Ma már valósággá vált, hogy egyre bonyolultabb manuális tevékenységeket robotokkal, sokkal ésszerűbben lehet elvégeztetni, mint emberekkel. A gépek a nap 24 órájában, a hét 7 napján egyformán nagy termelékenységgel képesek dolgozni.

A kezdeti próbálkozások a digitális számítógépek, a korszerű elektronikai elemek és az informatika megjelenésével új fejlődési irányt vettek, amelynek fő lépéseit az alábbiakban lehet összefoglalni:

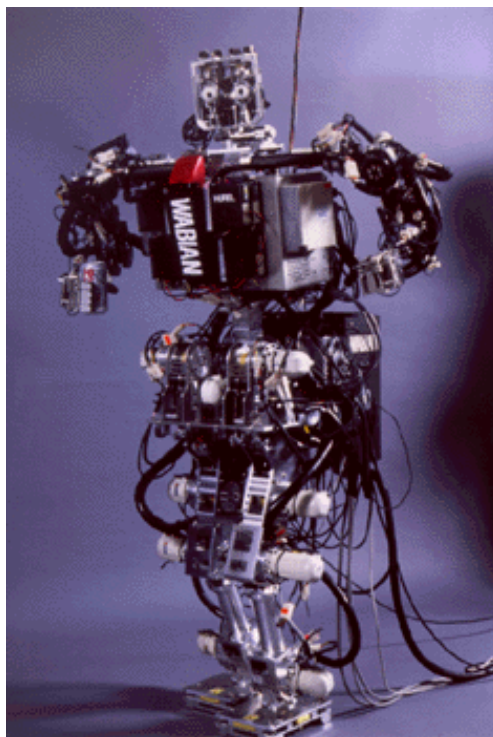
- 1946. G. C. Devol kifejleszt egy villamos jelek feldolgozására alkalmas vezérlő berendezést, amelyet később mechanikus berendezések vezérléséhez alkalmaznak.
- 1951. Goerzt és Bergsland kifejleszti a teleoperátort (amerikai szabadalom).
- 1954. C. W. Kenwart egy robotfejlesztési szabadalmat nyújt be (két karos, portál, sínen mozgó robot).
- 1959. Megjelenik az első sorozatgyártású ipari robot, a Planet Corporation fejlesztésében.
- 1960. Az első Unimate robot (számjegyes vezérlés, hidraulikus hajtás).
- 1966. A Trallfa cég kifejleszti és installálja az első festőrobotot.
- 1971. Kifejlesztik a Stanford kart, amely egy tisztán villamos hajtású kisrobot, a PUMA sorozat előfutára.
- 1973. Az első kísérleti robotprogramozási nyelv a SIRI és a WAVE, amit az AL nyelv követett. Mindkét nyelv a Scheimann és Shimano által kifejlesztett VAL robot-programozási nyelvhez vezetett.
- 1974. Az ASEA bevezeti az Irb6 villamos hajtású robotot, a Cincinnati Milacron cég pedig üzembe helyezi a T3 robotot.
- 1975. Az első szerelési művelet Olivetti SIGMA robottal.
- 1976. A Charles Draper laboratóriumban kifejlesztik a rugalmas csuklót, szereléshez.
- 1978. Az Unimation PUMA sorozatának a bevezetése.
- 1979. A Yamanashi Egyetem kifejleszti a SCARA robotot.

- 1981. A robotok direkt hajtásának kifejlesztése a Carnegi - Mellon Egyetemen.
- 1984. A Waseda Egyetemen kifejlesztik a WABOT-2 antropomorph robotot – 1.4. ábra.

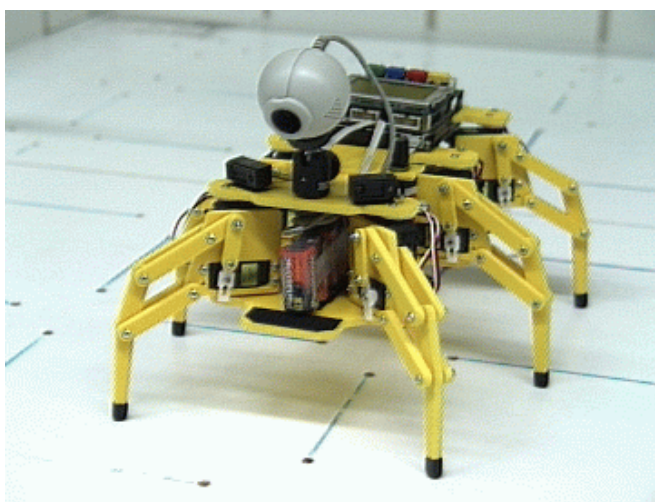


1.4. ábra

- 1985. Világméretben elkezdődik az autonóm mobil robotok és a harcászati robotok a fejlesztése. Megjelenik a robotok harmadik generációja.
- 1995. Megjelennek a különböző robot platformok, ezek között - jelentőségét tekintve - kiemelkedik, az ún. párhuzamos robot.
- 1995. Megjelennek a különböző mozgásokat (főként emberi mozgásokat) leképező robotok 1.5.- és 1.6. ábrák.



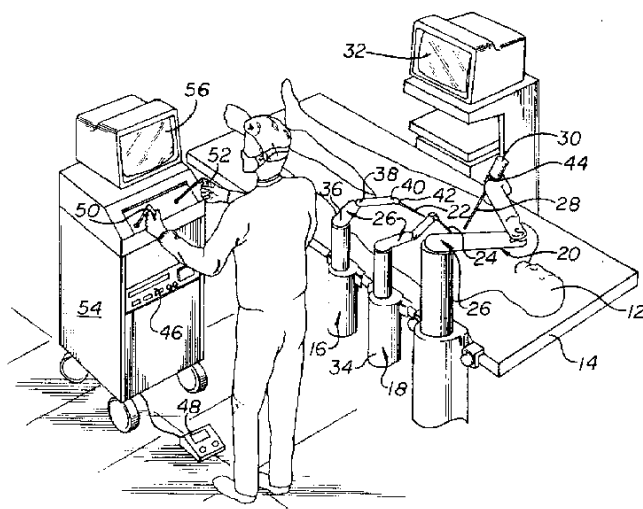
1.5. ábra



1.6. ábra

- 1998-ban az Amerikai Egyesült Államokban szabadalmaztatják a robotok orvosi alkalmazását (US Patent 005762485A 1998. Jun. 9.) – 1.7. ábra.





1.7. ábra

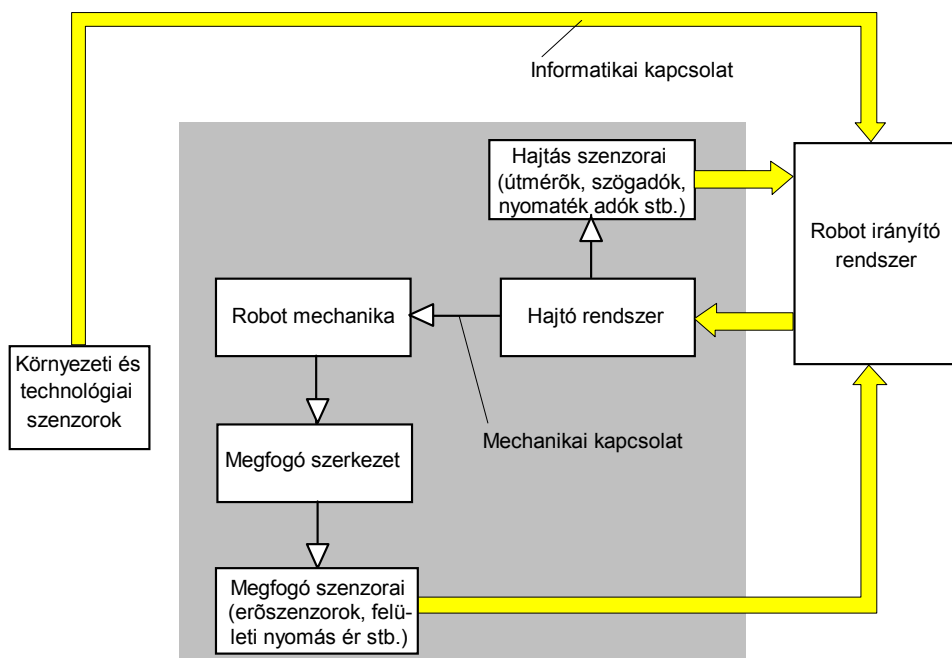
A fent leírtak azt mutatják, hogy a robottechnika egy interdiszciplináris tudománnyá vált, hiszen valamilyen gépi berendezés automatikus üzemmódban működik. Az automatikus működést általában programozható, irányító rendszerek biztosítják. Az irányító rendszerek az általuk mozgatott, munkát végző gépi berendezéshez informatikailag kétféleképpen is kapcsolódnak; egyrészt a berendezések mozgásállapotáról információkat gyűjtenek, másrészt mozgásuk indítása, további fenntartása vagy megállítása érdekében parancsokat adnak. Ezek a kapcsolódási platformok nem egyik napról a másikra teremődnek meg. Mind a mai napig folytonosan fejlesztéssel biztosítják, hogy az elektronika és az informatika legújabb eredményei a robotot, mint automatizálási eszközt, és mint technológiai berendezést a 21. század csúcstechnológiájának meghatározójává tegyék. A történelmi áttekintésből látható, hogy 1985 után viszonylag hosszabb idő telt el lényegi ipari újdonság megjelenése nélkül. Az 1995-ös év hozott csak lényegesebb előrelépést. Ennek oka inkább a gazdasági és a társadalmi viszonyok akkori alakulásában keresendő.

Az 1995-ös év a SEF cég az u.n. TRICEPT robot típusának megjelenésével forradalmasította a technológiát. A fejlesztés iránya ma is az, hogy a robot - intelligencia szintjének növelésével - hogyan tudja a munkafolyamatokban az embert helyettesíteni, az emberi karral végezhető műveleteket miként lehet úgy kiváltani, hogy a robot a környezeti feltételek változásaihoz is adaptálódjon.



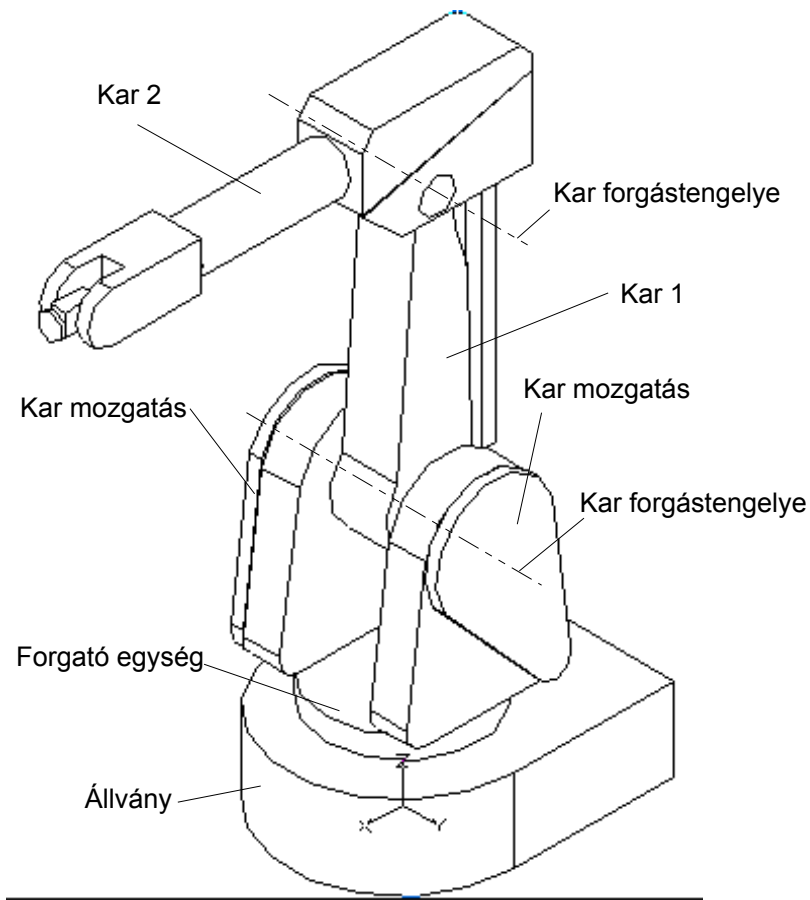
A robotok fent leírt struktúrája az 1.8. ábrán foglalható össze. Funkcionális egységeit tekintve az alábbi részekből áll:

- robot mechanika,
- hajtó egység,
- robot megfogó szerkezet,
- szenzorikai elemek,
- irányító rendszer a szoftverekkel.



1.8 ábra

A robotmechanika egy gépszerkezet, amely általában az emberi kar mozgását leképező mechanikai szerkezet, vagy az ember által végzett munkafolyamat mozgásait realizáló egyéb gépszerkezet. Egy, a karmozgást leképező szerkezet drótváz modelljét mutatja az 1.9. ábra.



1.9. ábra

A robotok legdinamikusabban fejlődő része az irányító rendszer, a hardver és a szoftver együttesen. Az irányítórendszer és a robotmechanika fejlődése kölcsönösen hat egymásra ezzel konstrukciójában, alkalmazhatóságában, kezelhetőségében és tudásában egyre fejlettebb, intelligensebb be-  
rendezések állíthatók elő.

## 2. A ROBOTOK KIALAKULÁSÁNAK TUDOMÁNYOS, MŰSZAKI ÉS TÁRSADALMI HÁTTERE (Háttéranyag)

\* **1943-1946** a pennsylvaniai egyetemen (Moore School) elkészül az első elektronikus kivitelű számológép az *ENIAC* (Elekctonic Numerical Integrator and Calculator). *NEUMANN János* a számítógép fejlesztésébe 1943-tól kapcsolódik be. A számítógépet 1956-ban - kifogástalan működése ellenére - elavult volta miatt lebontották. A mai fogalmak szerint a gép viszonylag lassú volt, azonban 1946-ban hihetetlenül gyors gépnek számított.

- A jelenlegi számítógépektől eltérően nem volt a mai értelemben vett memória egysége, tárolási célokra elektroncsöves felépített 20 db. egyenként tíz decimális jegyre terjedő számláló lánc szolgált.

- Az 1946-os műszaki színvonal és a fejlesztési költségek szinte korlátlan volta az alábbi műszaki jellemzőket eredményezte:

70 m<sup>2</sup> alapterület,  
18.000 elektroncső,  
1.500 jelfogó,  
150 [kW] teljesítmény.

\* **1947-1948 J. NEUMANN és H. GOLDSTINE** megbízást kapnak vezető katonai köröktől azoknak az elvi problémáknak a tanulmányozására, amelyek a numerikus számítások elektronikus eszközökkel való elvégzésénél felmerülnek. Eredményeiket 1947-ben és 1948-ban bizalmas jelentés formájában zárt körben publikálták. Az 1947-es első jelentésben megfogalmazott konstrukciós elvekre vonatkozó követelmények az alábbiak voltak:

- Szükség van párhuzamosan működő *MEMÓRIAEGYSÉG*-re, amely számokat és utasításokat tud tárolni,

- Szükség van *VEZÉRLŐEGYSÉG*-re, amely különbséget tud tenni a számok és utasítások között,

- Szükség van egy párhuzamos működésű *ARITMETIKAI EGYSÉG*-re, amely bináris rendszerű összeadásra, kivonásra, szorzásra és osztásra alkalmas,

- Szükség van egy olyan *KIMENŐ-BEMENŐ EGYSEG*-re, amely át tudja hidalni a gép gyors memóriaegysége és a lassú emberi memória közötti sebességkülönbséget.

\* **1947-1948** a princetoni egyetemen (Institute for Advanced Study) elkezdődik a *NEUMANN-GOLDSTINE* elv alapján egy újabb, az *EDVAC* (Electronic Discrete Variable Calculator) elnevezésű számítógép kivitelezése, amely az első mai értelemben vett elektronikus digitális számítógépnek tekinthető, de a követelményeket egészükben, csak 1960-ra sikerült megoldani.

\* **1948** a *tranzisztor* áramköri építőelem lesz. - A félvezető-technika területén végzett közel húszéves világméretű kutatás után az USA-ban, a Bell Laboratóriumban *John BARDEN*, *Walter Huser BRATTAIN* és *Williem SHOKLEY* amerikai tudósoknak sikerül a tranzisztort technikailag alkalmazható erősítő áramköri elemmé fejleszteni.

\* **1952** egy amerikai repülőgépgyár felkérésére elkészül az NC-gép prototípus változata a MIT (Massachusetts Institute of Technology) laboratóriumában. Az alkatrészek programozása APT alapú programnyelvre épül.

\* **1954** *J. W. BACKUS* kidolgozza a FORTRAN (formula translator) programozási nyelvet.

\* **1955** az USA-ban a Bell Laboratories társaságnál üzembe állítják a világ első, tranzisztorokkal készült számítógépét, *J. H. Felker* TRADIC-ját. Az elektroncsövek helyett tranzisztorokkal felszerelt számítógépek **második generációs számítógépekként** váltak ismertté.

\* **1956** *John von NEUMANN* a Connecticut állambeli New Haven-ben lévő Yale Egyetem felkérésére a SILIMAN-előadásokra készülve összefoglalja a számítástechnika terén végzett addigi kutatásait, amelyet „*Számítógép és az agy*” címmel kívánt kiadni. Ezzel lefektette a mesterséges intelligencia kutatásának alapjait. Sajnos megrendült egészségi állapota már nem tette lehetővé, hogy a SILIMAN-előadásokat megtartsa, kéziratai alapján csak felolvasták helyette. Az előadás sorozat sem volt teljes, mert súlyos betegsége abban is megakadályozta, hogy valamennyi előadásának kéziratát elkészítse. 1957. február 8-án bekövetkezett haláláig már nem is hagyta el a washingtoni Walter Reed kórházat.

\* **1958** a Texas Instruments cégnél *Jack S. KILBY* elkészíti az első integrált áramkört, amit *chip-nek*, neveznek. (A gondolat már 1952-ben felvetődött a Royal Radar Establishment Intézetnél).

\* **1959**-ben a Párizsban tartott 6. európai szerszámgép kiállításon először Európában is bemutatták a NC-szerszámgépet. Az 1967-es Hannover-i kiállításon már több mint 200 hasonló NC-gépet mutattak be. Ezzel a számítógépi elv az ipar számára egy olyan automatizálási eszközt teremtetett, amely gyökeresen átalakította az ipari termelési folyamatokat.

\* **1959** megjelenik az *első sorozatgyártású ipari robot*.

\* **1961** a németországi IBM bemutatja a Tele-Processing eljárását. Ezzel az eljárással a telefonon közvetített adatok számítógéppel tovább feldolgozhatók. Az a lehetőség, hogy a számítógépeket telefonhálózat segítségével, egymással összekötik, az elektronikus adatfeldolgozás új határát lépte át.

\* **1962** elkészülnek azok a számítógépek, amelyekben mini tranzisztorokat és diódákat alkalmaztak. Ezzel megjelenik a *számítógépek harmadik generációja*.

\* **1965** Európában elsőként Nyugat-Berlinben helyeznek üzembe közlekedést irányító számítógépet. Az irányító rendszer az úttestben elhelyezett indukciós hurok segítségével adatokat gyűjt a forgalomról és ennek megfelelően kapcsolja a közlekedési lámpákat, a rendszer tehát egy folyamatoptimalizálást is végez.

\* **1968** a miniatürizált integrált áramköröknek a számítás- és adatfeldolgozó technikában történt bevezetésével kialakul a *számítógépek negyedik generációja*.

\* **1969** az amerikai APOLLÓ Holdra szállási program keretében fejlesztette ki a számítógépipar az első ún. ADATBANK rendszert. Az adatbank rendszerrel lehetővé vált különböző munkaterületek és szakterületek széles köreinek legfontosabb információit elraktározni és a felhasználói jogosultságokat meghatározni.

\* **1971** megjelenik a Texas-Instruments cég fejlesztésében a MIKROPROCESSZOR.

\* **1983** megjelennek a személyi számítógépek és ezzel kezdetét veszi az irodai automatizálás.

\* **1983** a Volkswagen Művek Wolfsburg-i gyárában üzembe helyezik az újonnan felszerelt végszerelő csarnokot, ahol túlnyomórészt robotok dolgoznak. Ez az első állomása annak a folyamatnak, amely a világ több országában Amerikától - Japánig létrehozta - hacsak részfeladatokra is - az automatizált gyárak felé vezető utat, amely átvezet a XXI. századba, nem kis társadalmi feszültséget keltve.

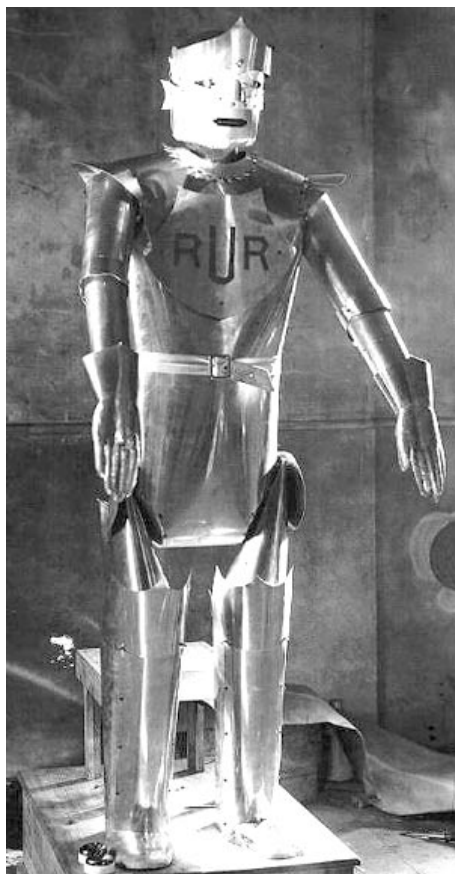
\* **1994.** január 25. „Együtt kell dolgoznunk a magánszektorral, hogy 2000-re Amerika minden osztályát, minden könyvtárát, minden kórházát bekössük egy nemzeti információs pályába. Idén felkérem a Kongresszust, hogy hozzon törvényt az információs szuper országút létrehozására”. (B. Clinton elnöki szózata az Egyesült Államokhoz).

\* **1994.** július 15. „*EUROPE and the Global Information Society*”. (Európai válasz a Clinton-i felhívásra az ún. Bangemann-féle jelentésben).

A 21. század az információ százada, ennek új közművei a számítógépes hálózatok, informatikai és automatikai rendszerei két évvel a századba való belépés előtt nagy elmaradást mutat pedig a társadalom fejlődésének alapját képezi. Stratégiai és operatív döntések akár termelési, akár a társadalom más szférájának szintjén nélkülük nem hozhatók meg. A felvázolt eredmények össztársadalmi hatása a tudomány egyéb eredményeivel olyan társadalmi átstrukturálódást eredményez, amelynek hatása globális méretű, és megindul a *Globális Információs Társadalom (GIS Global Information Society)* kialakulása.

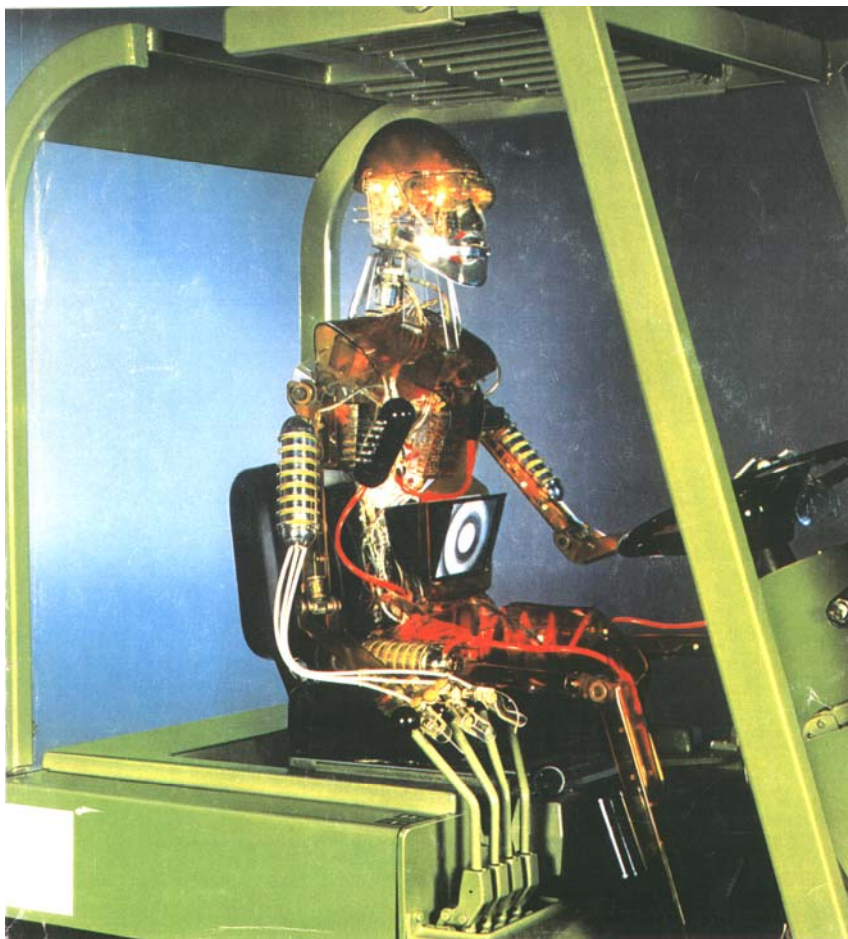
### 3. ROBOTOK FOGALMI MEGHATÁROZÁSA

A robot megnevezést a cseh „*robota*” szóból vezetik le, ami munkát jelent. Karel Čapek cseh drámaíró, - az 1920-ban írt utópisztikus tragikomédiájának - a *Rossum's Universal Robots (RUR)* című színművének megjelenése és bemutatása után terjedt el a fogalom. A darabban a robotok gépi szörnyek voltak, amik hasonlítottak az emberre és fellázadtak megalkotóik ellen, megölték őket és átvették a földön a hatalmat. A színműbeli robotok kétszer annyit tudtak dolgozni, mint az emberek. A Karel Čapek RUR figuráját a 3.1. ábra mutatja.



3.1. ábra

Sokáig vita tárgya volt a robotok emberekhez való viszonya, illetve android tulajdonságának határa. Még 1977-ben is felmerült az android tulajdonság, mint targoncát vezető robot – 3.2. ábra.



3.2. ábra

A fogalommal kapcsolatos vitát 1981-ben a VDI (Német Mérnökök Egyesülete) zárta le, amikor egyértelműen leszögezte, hogy az ipari robotok nem androidok és az azóta világviszonylatban elfogadott definíciót adta, amelyet a VDI 2860 irányelvben is rögzített. E szerint: az ipari robot univerzálisan állítható többtengelyű mozgó automata, amelynek mozgásegymásutánisága (utak és szögek) szabadon - mechanikus beavatkozás nélkül - programozható és adott esetben szenzorral vezetett, megfogóval, szerzővel vagy más gyártó eszközzel felszerelhető, anyagkezelési és techno-



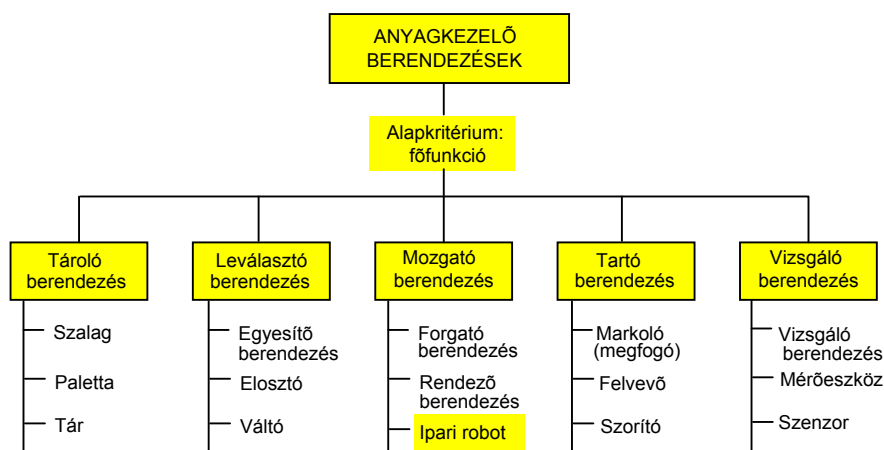
lógiai feladatra felhasználható. A tengelyek alatt a programozott mozgásokat kell érteni (a több tengely, több programozott mozgást jelent).

### 3.1. Robotok funkcionális elemzése

Az ipari robotok mechanikai szerkezetei az anyagkezelő berendezésekből fejlődtek ki, ezért a továbbiakban az ipari robotok fenti definíció szerinti funkcionális elemzését mutatjuk be. Az anyagkezelő berendezések fő funkcionális egységei a VDI 2860 szerint:

- tároló berendezés,
- leválasztó berendezés,
- mozgató berendezés,
- tartó berendezés,
- vizsgáló berendezés

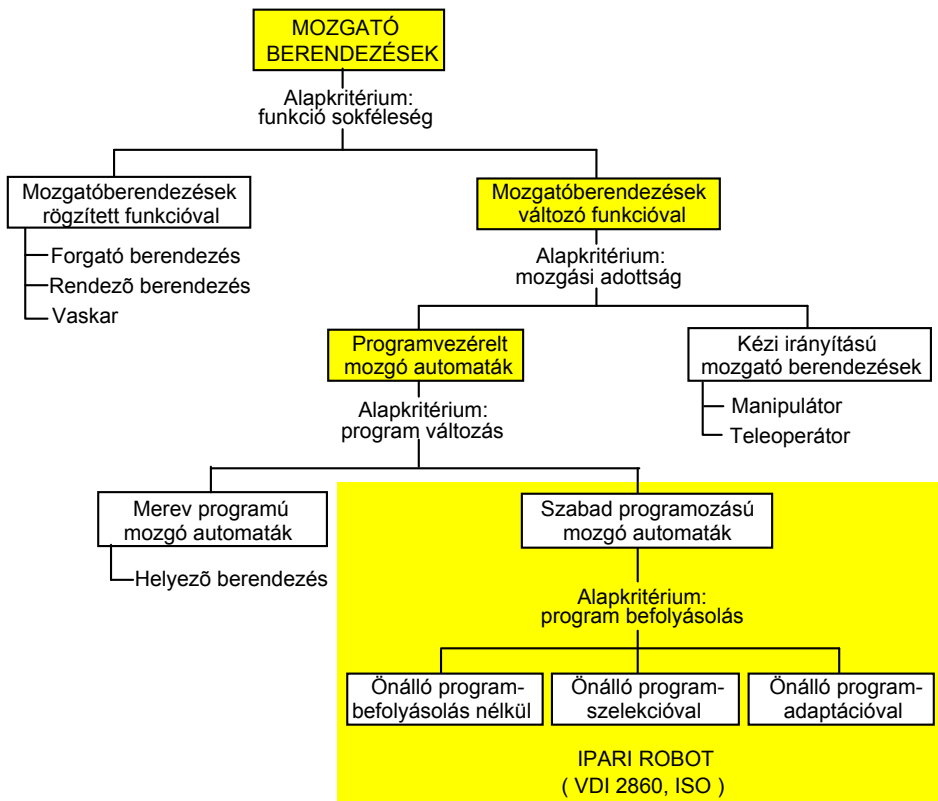
amit a 3.3. ábra mutat.



3.3. ábra

A mozgatóberendezés további elemzését a 3.4. ábra mutatja. A funkcionális elemzés alapja a mozgatóberendezés funkciójának sokfélesége, tehát annak meghatározása, hogy a mozgási lehetőségek változtathatók-e, vagy rögzítettek-e. Amennyiben a mozgás tartalma változtatható, meg kell vizs-

gálni, hogy ez az adottság kézi irányítással vagy pedig programvezérléssel realizálható.



3.4. ábra

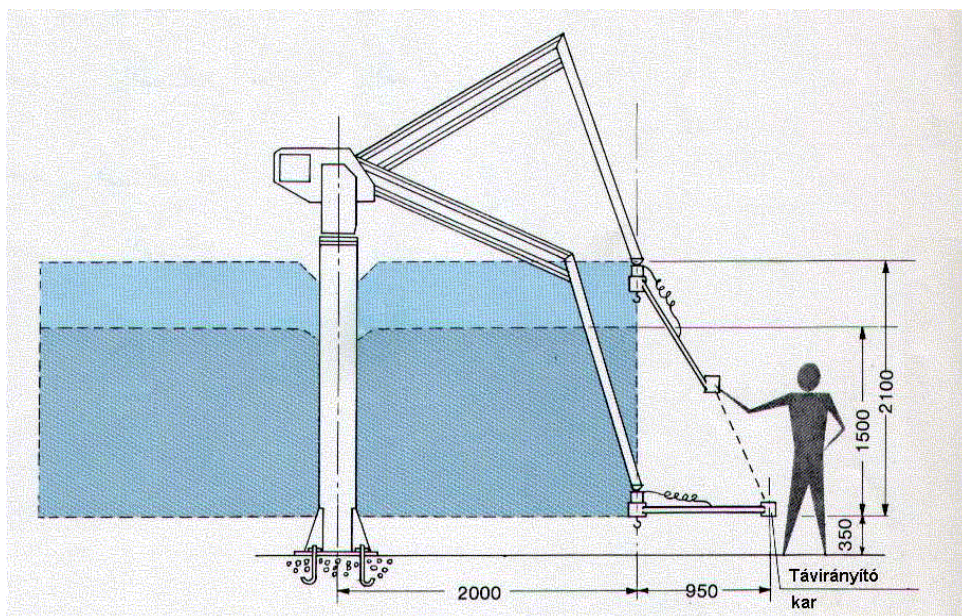
A kézi irányítású berendezések között két csoport különböztethető meg:

- manipulátor,
- teleoperátor.

### 3.1.1. Manipulátor

A manipulátor kézi irányítású mozgatóberendezés, amelyet főként anyagkezelési célokra használnak. Egyik legegyszerűbb változatát a 3.5. ábra mutatja. A berendezés egy álló oszlop körül elforgatható súlyki-egyenlített pantográf szerkezet. A mozgatandó anyag horogszerkezettel,

vagy más teherfelvevő elemmel rögzíthető a manipulátor karhoz. A mozgató anyag rögzítése után a manipulátor karon lévő fogantyú segítségével, kézi erő kifejtésével, az anyag a célhelyzetbe juttatható. A manipulátor fődémre függesztett formában is kivitelezhető.



3.5. ábra

A nagyteherbírású manipulátorok esetén a mozgató anyag pontos irányított pozícióba helyezését közvetlen programozással gépi úton oldják meg. Ilyen megoldást mutat a 3.6. ábra.



3.6. ábra

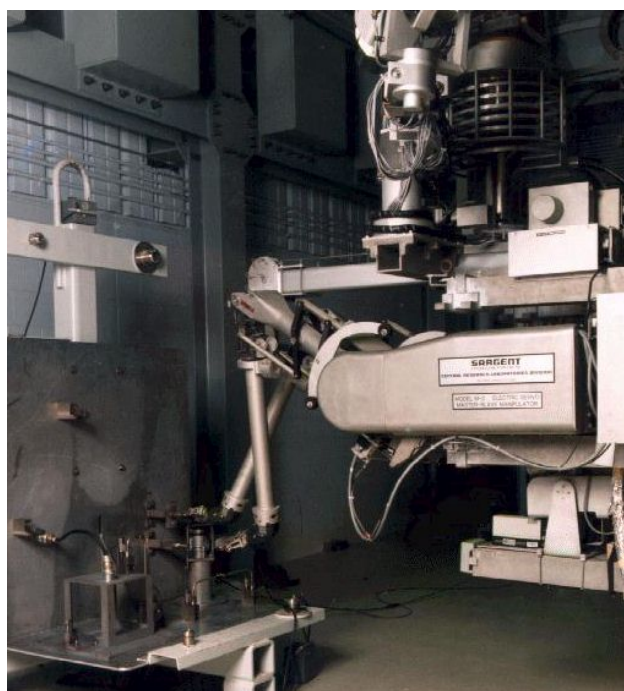
### 3.1.2. Teleoperátor

A teleoperátor távirányított manipulátor. A távirányítást végezhetjük rudazattal, vagy joy-stick rendszerű erőátviteli rendszerrel. Főleg ott alkalmazzák, ahol az anyagmozgatási vagy a technológiai munkatér az ember számára veszélyes. A kezelő részére ekkor egy figyelőablakkal ellátott hermetikusan zárt kezelő termet alakítanak ki, ahonnan a munkatér belátható. A teleoperátorok master-slave rendszerben dolgoznak, ahol a kezelő által moz-

gatott irányító karok a master rész, a végrehajtó szerkezet pedig a slave be-  
rendezés. Egy master-slave rendszert mutat a 3.7- és 3.8. ábra.



3.7. ábra

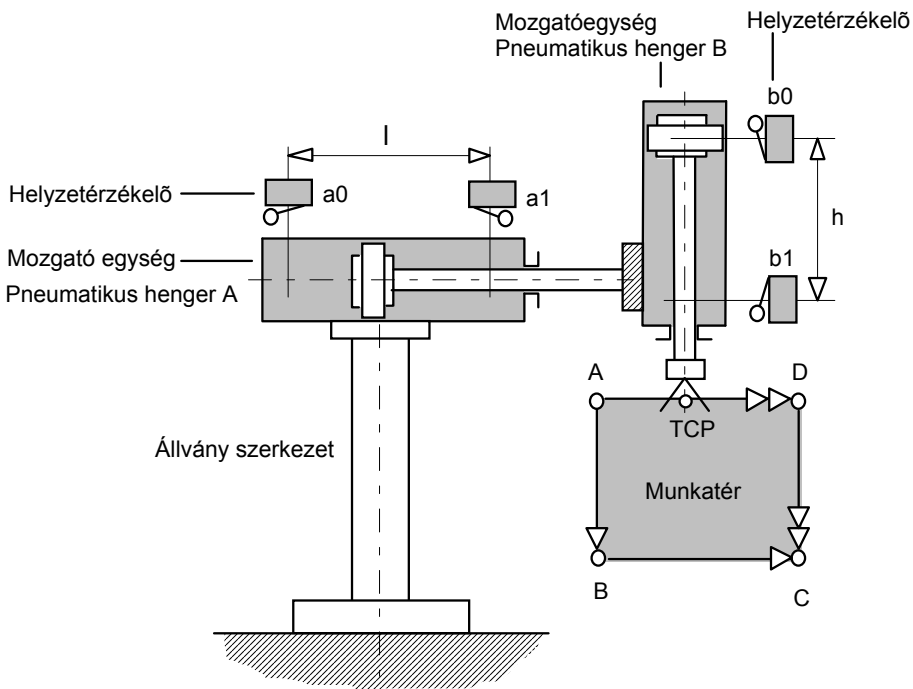


3.8. ábra



### 3.1.3. Helyező berendezés

Amennyiben a programvezérlés csak egyetlen mozgásciklus végrehajtására alkalmas, helyező berendezésről beszélünk. A helyező berendezések olyan mozgó automaták, amelyek mozgásai, mozgás egymás-utánisága (útja és/vagy szöge) egy mereven megadott program szerint fut le és mechanikus behatás nélkül nem változik meg. Általában megfogó-szerkezettel van felszerelve. Felépítését a 3.9. ábra mutatja.



3.9. ábra

A mereven megadott program a 3.5. ábra két mozgásciklusa alapján azt jelenti, hogy az ABC mozgásútvonal ADC-re való megváltoztatása az irányítórendszer fizikai szétbontását és egy új összeépítését követeli meg. Ilyen irányítórendszerek a pneumatikus logikákkal realizált vezérlések és a huzalozott relés logikára épülő vezérlések.

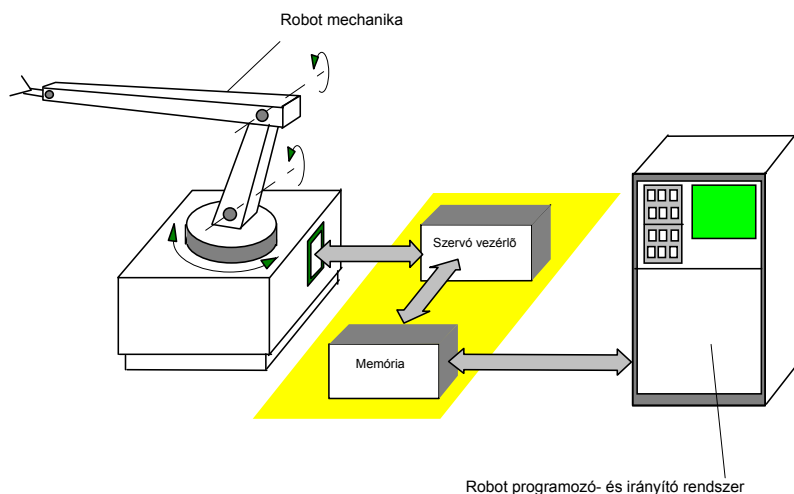
### 3.1.4. Ipari robotok

Az ipari robotok definíciójából következik a mechanikus beavatkozás nélküli átprogramozhatóság. Az átprogramozhatóság (programmódosítás, vagy programbefolyásolás) többféle módon végrehajtható. Ezek a lehetőségek a robot fejlettségére (intelligencia szintjére) is utalnak. Jelen fejezetben három esetet tekintünk át:

- önálló programbefolyásolás nélküiség,
- programszelekció,
- programadaptáció.

#### a) Önálló programbefolyásolás nélküli ipari robot

Felépítését és az irányítórendszerrel való funkcionális kapcsolatát a 3.10. ábra mutatja. Ebben az esetben az önálló programbefolyásolás nélküiség azt jelenti, hogy minden új munkaciklushoz az irányítóberendezés kezelőszerveivel (klaviatúrájával) kell inicializálni az aktuális programot. Amennyiben a munkaciklushoz archivált programmal rendelkezünk, a

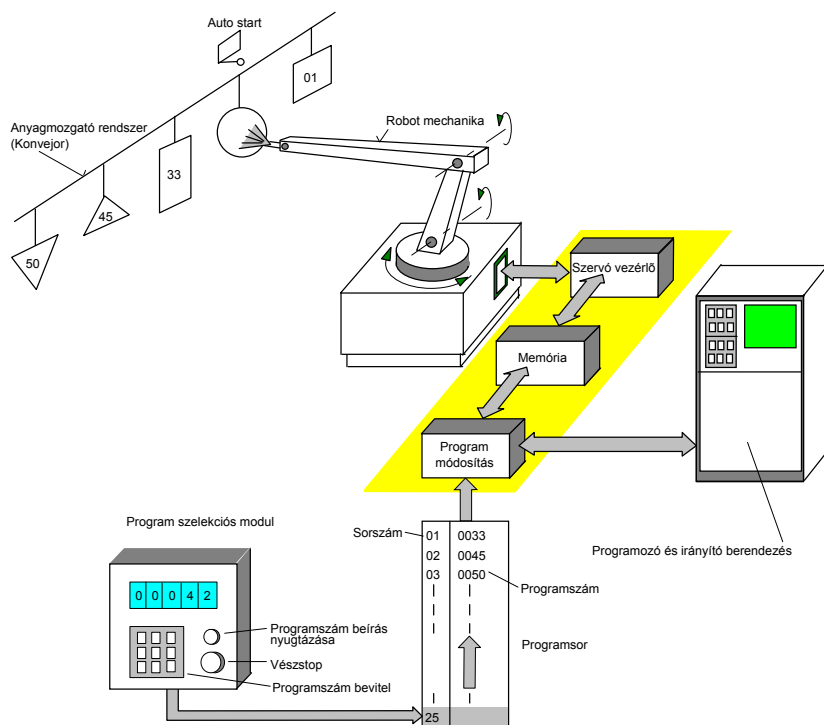


3.10. ábra

program betöltését és újraindítását kell elvégezni, ha ilyen nincs, akkor új programot kell írni.

## b) Programszelekcióval rendelkező ipari robot

Felépítése és az irányítórendszerrel való kapcsolata a 3.11. ábrán látható. A különböző munkaciklusokhoz való programok a külső, vagy belső memóriába írhatók és ott tárolhatók. Ezek a programok külső jel hatására tetszőleges sorrendben aktivizálhatók (szelektálhatók) és egy u.n. programsorba rendezhetők. A programsorba rendezést a 3.11. ábrán lévő programszelekciós modul segítségével végezhetjük.



3.11. ábra

A programszelekciós modul lényegében egy klaviatúra, amellyel a mozgásciklusnak vagy a technológiai feladatnak megfelelő program – pl. program-szám vagy más programazonosító segítségével – a programsorba helyezhető. A programszelekciós modult fizikailag a technológiai rendszer azon pontján kell elhelyezni, ahol az anyagok az anyagmozgató rendszerre feladásra kerülnek. Így a robot mozgásprogramjának jellemzője és a technológia tárgya könnyen azonosítható. A programsorban és a technológiai rendszerben így egymáshoz hozzárendelt mozgásprogram és meg-munkálandó

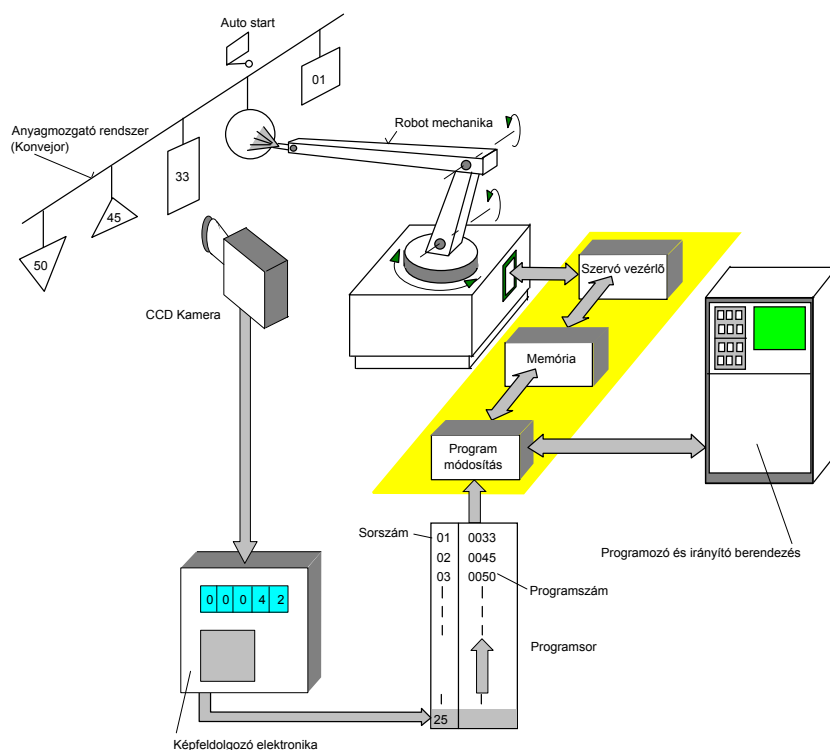


alkatrész sorrend alakul ki. A 3.11. ábrán ez a sorrend látható is a program-sorban és az anyagmozgató rendszeren. A technológiai munkahelyhez érve az automatikus startkapcsoló inicializálja a programsor első helyén lévő programot és így indulhat a robot mozgása. Az anyag-mozgató rendszer mozgása és a robot munkaciklusa úgy van összehangolva, hogy a következő függesztkének az automatikus start kapcsolóig való előre mozgása alatt a munkaciklus befejeződjön és az új program inicializálása létrejöhessen.

A fentiek alapján látható, hogy a programszelekció egy fejlettebb robotirányító szoftvert követel, amely lehetővé teszi a munkaciklusokat leíró programok sorba rendezését.

### c) Programadaptációval rendelkező ipari robot

A programadaptációval rendelkező ipari robot telepítését és az irányító rendszerrel való kapcsolatát a 3.12. ábra mutatja.



3.12. ábra

A rendszer működése annyiban tér el a programszelekcióval rendelkező robotoktól, hogy itt a tárolt programoknak a sorba rendezését egy automa-

tikus azonosítási rendszer végzi. A 3.12. ábrán az azonosítást egy képfeldolgozó rendszer végzi, így a robot - munkaciklusát tekintve - adaptálódni tud a környezetében bekövetkező változásokhoz. Ezt a változást esetünkben az anyagmozgató rendszeren érkező újabb munkadarab vagy alkatrész jelenti. Ha a robotnak ezt a működési feltételrendszerét összehasonlítjuk az előző pontban tárgyalt programszelekciós működési feltételekkel megállapíthatjuk, hogy a programadaptáció fejlettebb irányító szoftvert igényel, amivel a robot intelligencia szintje növekszik.

### 3.2. Robotok csoportosítása

Az 1. fejezetben leírtakból ismert, hogy a robotmechanika az emberi kar mozgását, illetve az ember munkavégzési mozgásciklusát leképező gépszerkezet, amely mechanikai testek (karok, tagok) kinematikai kényszerekkel való egymáshoz kapcsolásával építhető fel. A robot mechanikák tehát kinematikailag tagokat és kényszereket tartalmazó elemek térbeli kombinációja. A kényszerek az általuk összekapcsolt tagoknak általában forgó- és egyenes vonalú mozgást biztosítanak. A robotok alapvető mozgása - a 4. fejezetben részletesen ismertetésre kerül - általában három tag egymáshoz viszonyított helyzetével leírható. A robotmechanika három tagja két kényszer segítségével kinematikailag  $2^3 = 8$  egymástól független változatban kapcsolható egymáshoz és egy rögzített gépállványhoz. Jelöljük R-rel a forgást, T-vel pedig az egyenes vonalú mozgást biztosító kényszert. A tagok összekapcsolási változatai a fenti jelölésekkel

- R R R,
- R T R,
- T R R,
- R R T,
- T R T,
- R T T,
- T T R,
- T T T.

A fenti kombinációkból a

- T T T,
- R T T,

- R R T,
- R R R,
- T R R

változatok terjedtek el a gyakorlati alkalmazásban és alapvetően meghatározzák azokat a koordinátarendszereket, amelyek alapján a robotok csoportosíthatók. Mozgásaik által meghatározott koordinátarendszerek alapján az alábbi robotosztályok különböztethetők meg:

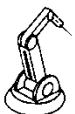
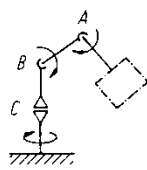

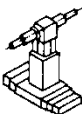
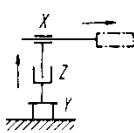

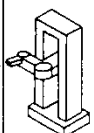
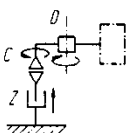

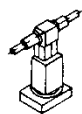
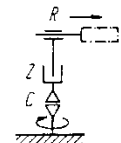


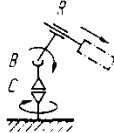

- derékszögű koordinátarendszerű T T T,
- henger koordinátarendszerű R T T,
- gömbi koordinátarendszerű R R T,
- csuklós rendszerű
  - függőleges síkú csuklókaros R R R
  - vízszintes síkú csuklókaros robot,

amelyeket a 3.13. ábra mutat. A három translációs kényszerrel rendelkező T T T robot osztállyal kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a kinematikai kényszereket nemcsak ortogonálisan lehet elhelyezni, amely a derékszögű koordinátarendszerű robotot szolgáltatja. Különösen az utóbbi időben jelennek meg a T T T osztállyal kapcsolatban különböző robotplatformok, mint a párhuzamos és a trianguláris koncepció.

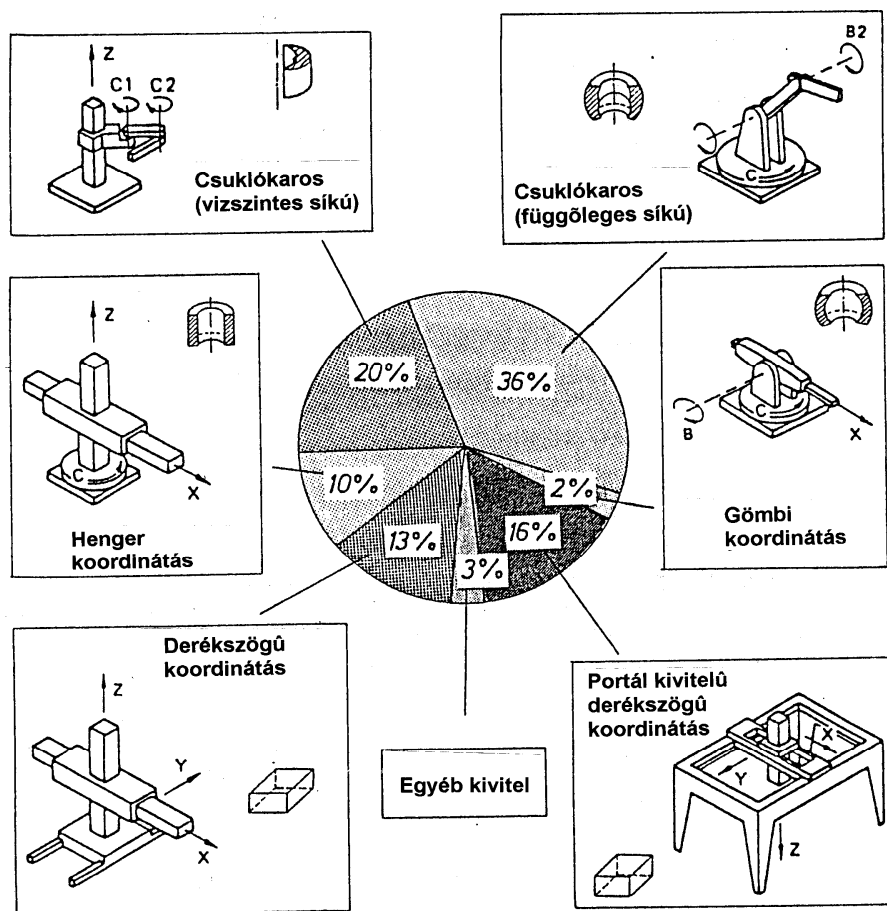
Az egyes osztályok alkalmazásának százalékos megoldását a 3.14. ábra mutatja.

### 3.3. Ellenőrző kérdések

1. Honnan származik a robot megnevezés ?
2. Milyen berendezéstípusból származtatják az ipari robotokat ?
3. Mi a manipulátor ?
4. Mi a teleoperátor ?
5. Mi a helyező berendezés?
6. Az ipari robotok átprogramozhatósága hogyan érvényesül a robotok hardver rendszerében?
7. Milyen robot osztályok különböztethetők meg?
8. Az egyes robot osztályok hogyan jelennek meg a felhasználásban?

Kinematikai jelleg	Képi nézet	Kinematikai felépítés	Munkatér
Csuklókaros (függőleges síkú)			
Derékszögű koordinátás			
Csuklókaros (vízszintes síkú)			
Henger koordinátás			
Gömbi koordinátás			

3.13. ábra



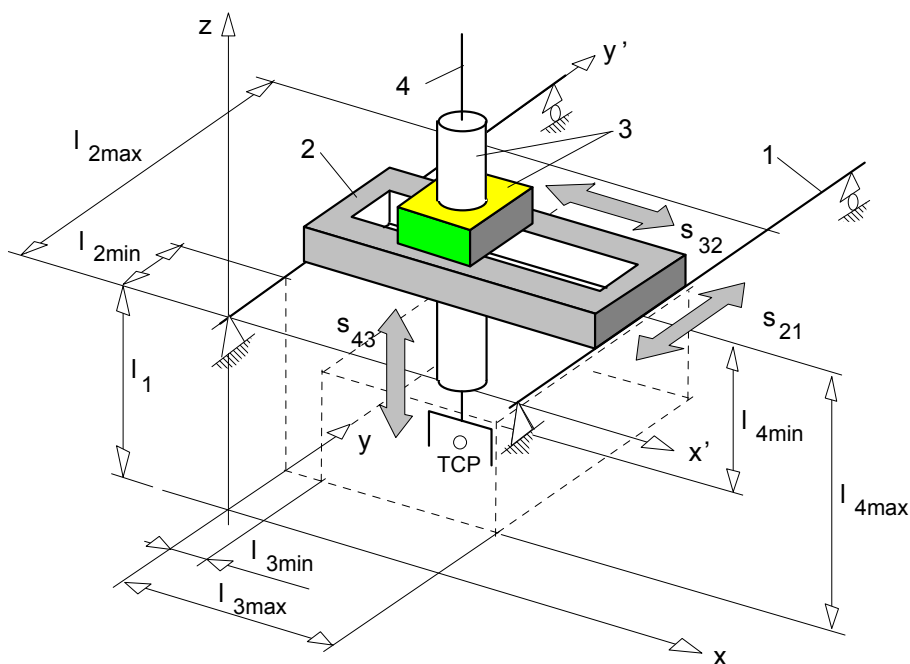
3.14. ábra

## 4. ROBOTOK FELÉPÍTÉSE

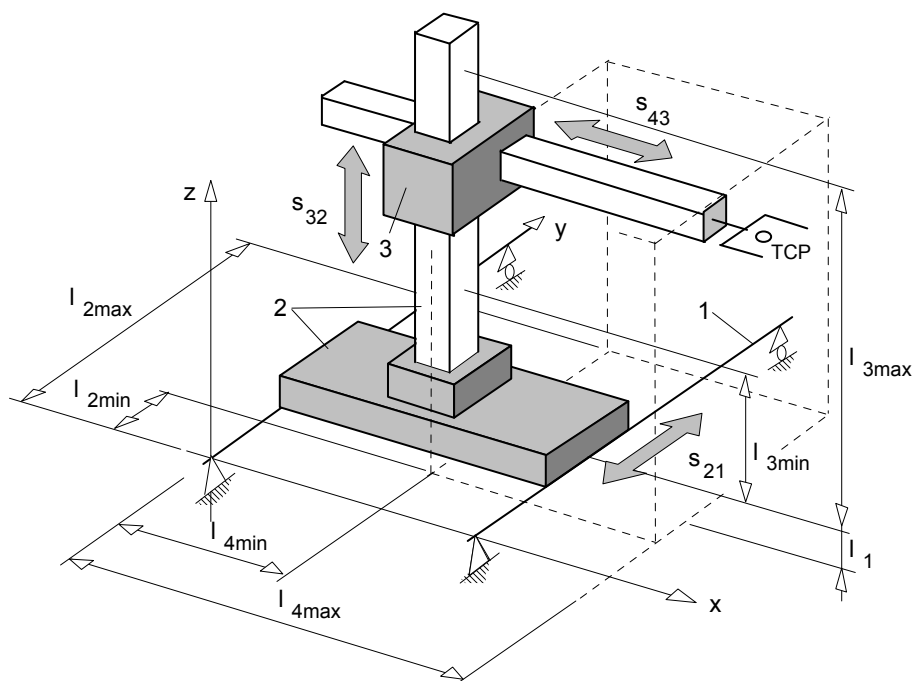
### 4.1. Robotok mechanikai rendszerének koordinátarendszerek szerinti felépítése, robotmechanikák

#### 4.1.1. Derékszögű koordinátarendszerű robot

A derékszögű koordinátarendszerű robotok tagjait (karjait) összekapcsoló, -transzlációs mozgást lehetővé tevő- kényszerek ortogonális elhelyezésűek. Felépítésüket tekintve két típusuk ismert, a 4.1. ábrán lévő portál rendszerű és a 4.2. ábrán lévő álló változat. A továbbiakban 1 jelzéssel a robot tartószerkezetét (állványát) jelöljük 2, 3 és 4 jelzéssel pedig a karokat.



4.1. ábra



4.2. ábra

A 3.9. ábra jelképi jelöléseivel is lehet képezni robot modelleket. A 4.2. ábra robot modelljét jelképi jelölésekkel a 4.3. ábra mutatja.

Minden robot egy ún. világkoordináta-rendszerrel jellemezhető. A világkoordináta-rendszer a robot bázis koordinátarendszere általában a robot állványához rögzített. Ebben a koordinátarendszerben definiálható a robot munkavégző pontjának, vagy szerszám-középpontjának (Tool Center Point, a továbbiakban TCP pont) pályája, a kinematikai kényszerekben működtetett kinematikai előírások (ún. ízületi koordináták)  $\varphi(t)$  vagy  $s(t)$  segítségével.

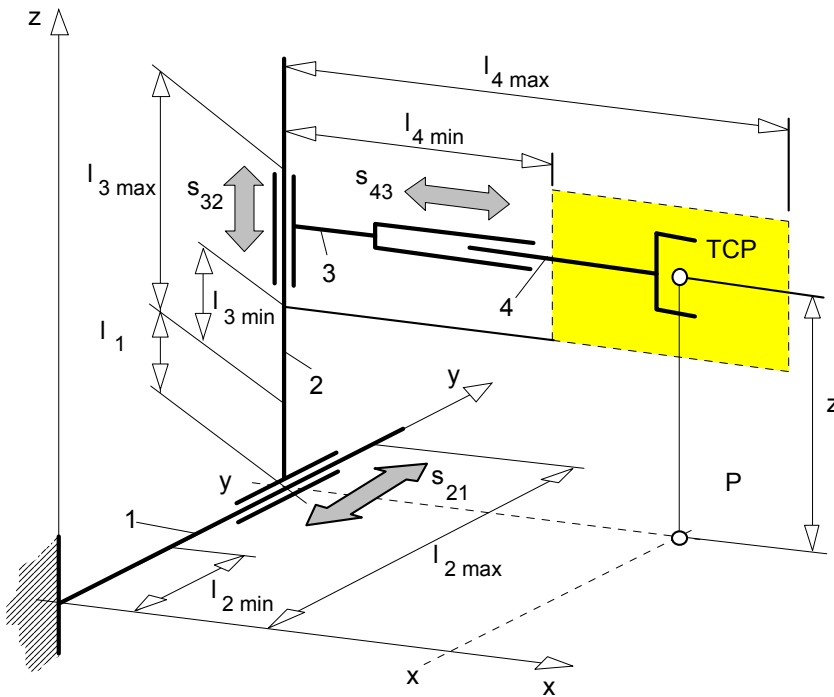
A robottechnikában használatos még egy koordinátarendszer, amely a robotkarokhoz rögzített. A koordinátarendszer kezdőpontja általában a karokat összekapcsoló kinematikai kényszerrel egybeesik. Alkalmazásukkal könnyen leírható a karok relatív helyzete és egyszerűen értelmezhetők az őket meghatározó kinematikai előírások. A robottechnika - főleg angol nyelvű - szakirodalma ezeket a koordinátarendszereket frame-eknek vagy frame koordinátarendszereknek, a relatív helyzetet leíró kinematikai előírásokat pedig ízületi koordinátáknak nevezi.

A 4.2. ábrán lévő álló kivitelű derékszögű koordinátarendszerű robot TCP pontjának térbeli helyzetét

$$x = \ell_{4\min} + s_{43},$$

$$y = \ell_{2\min} + s_{21}, \quad (4.1)$$

$$z = \ell_1 + \ell_{3\min} + s_{32}$$



4.3. ábra

összefüggések írják le, ahol  $\ell_1, \ell_{2\min}, \ell_{3\min}$  és  $\ell_{4\min}$  szerkezeti méretek  $s_{21}, s_{32}$  és  $s_{43}$  pedig a megfelelő karok elmozdulásai (kinematikai előírások). Ez utóbbi jellemző értékei  $[s_{\min}, s_{\max}]$  intervallumban változnak, általában  $s_{\min} = 0$ . Így (4.1) az idő függvényében is felírható az



$$x(t) = \ell_{4\min} + s_{43}(t)$$

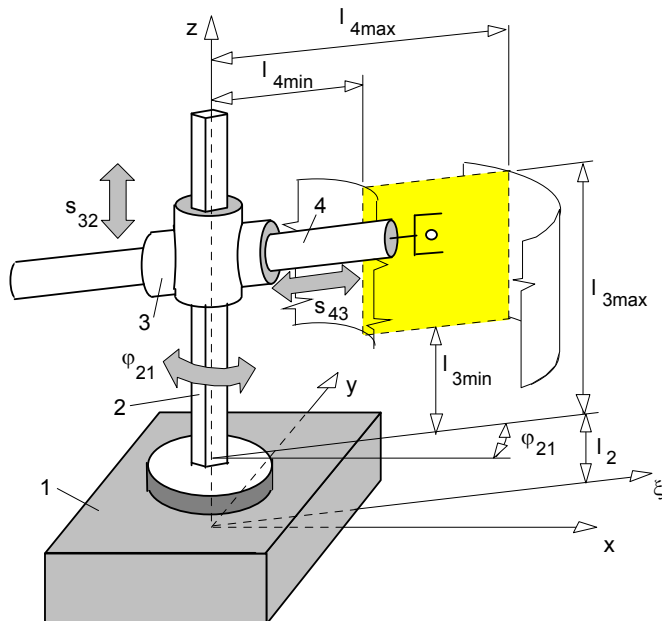
$$y(t) = \ell_{2\min} + s_{21}(t) \quad (4.2)$$

$$z(t) = \ell_1 + \ell_{3\min} - s_{32}(t)$$

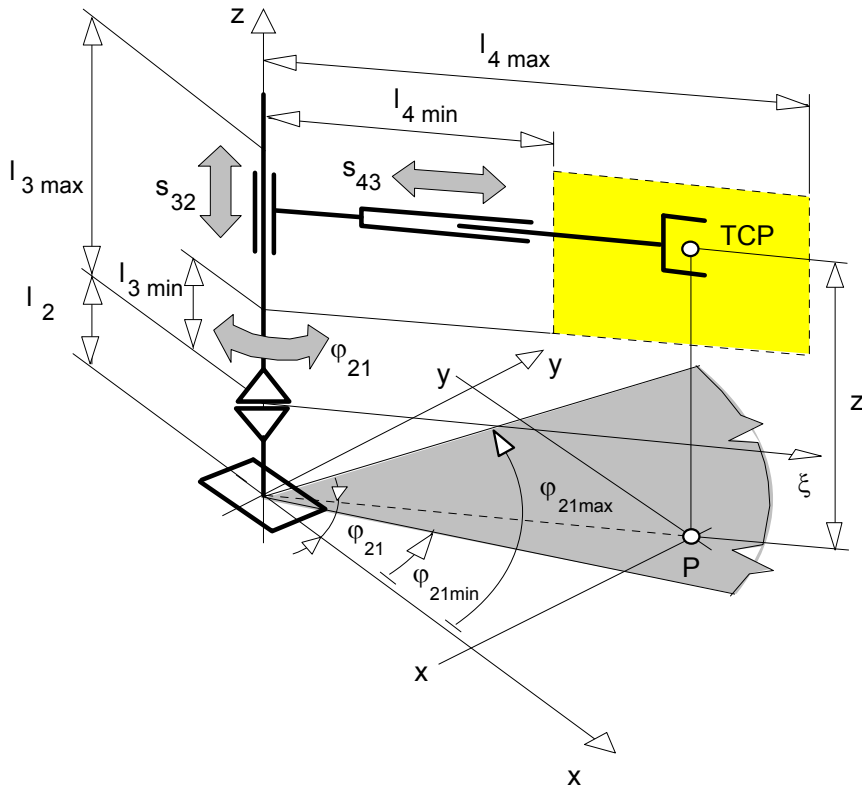
egyenletekkel.

#### 4.1.2. Henger koordinátarendszerű robot (RTT)

A hengerkoordináta-rendszerű robot tagjait összekapcsoló kényszerek közül a translációs mozgásokat megvalósítók ortogonálisan helyezkednek el. A forgó mozgást realizáló kényszer tengelyvonala pedig egybeesik az egyik translációs kényszer tengelyvonalával, így alakul ki a henger koordináta rendszer. A robot felépítését és mozgásait a 4.4. ábra mutatja. A 3.9. ábrán lévő jelképi jelölések alapján a 4.5. ábra szerinti modellel is leírható a robot TCP pontjának mozgása. A 4.5. ábra alapján, a



4.4. ábra



4.5. ábra

TCP pont koordinátái a robot világkoordináta-rendszerében

$$x = (\ell_{4 \min} + s_{43}) \cos \varphi_{21},$$

$$y = (\ell_{4 \min} + s_{43}) \sin \varphi_{21}, \quad (4.3)$$

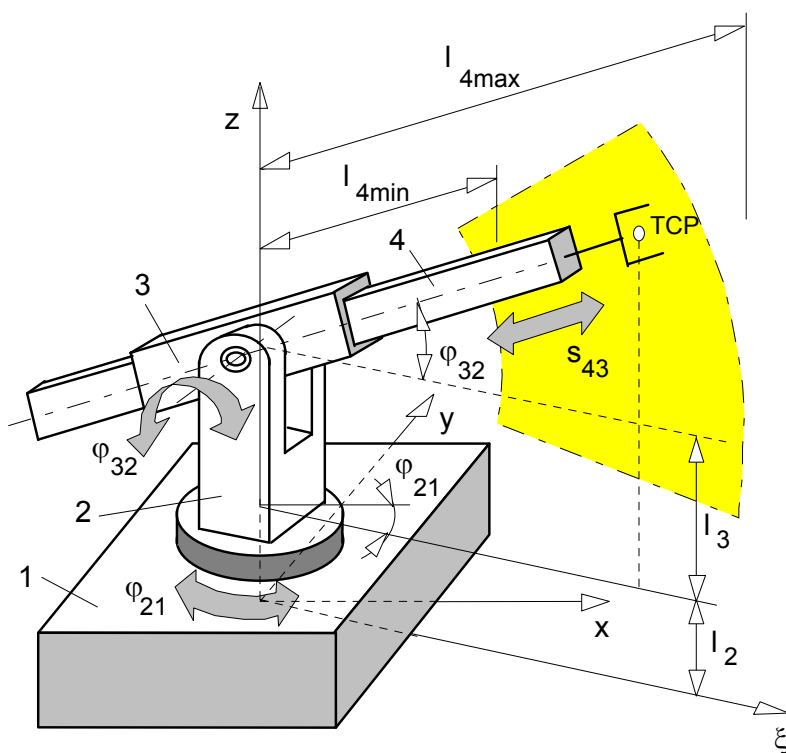
$$z = \ell_2 + \ell_{3 \min} + s_{32}$$

egyenletekkel határozhatók meg, ahol  $s_{32}(t)$  és  $s_{43}(t)$  a translációs mozgások,  $\varphi_{21}(t)$  pedig a rotációs mozgás kinematikai előírásai. Itt is érvényes, hogy a kényszerek kimeneti előírásai csak meghatározott tartományban érvényesek. A translációs mozgások korlátja azonos a derékszögű koordináta-

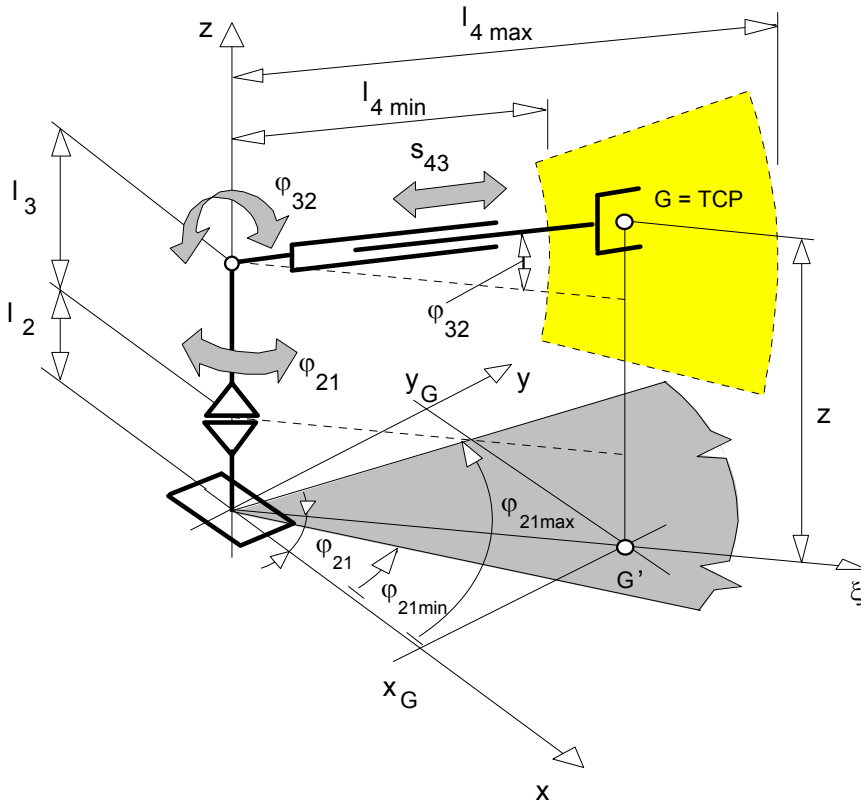
rendszerű robotnál tett megállapítással. A rotációs mozgás korlátja a 4.5. ábrát figyelembe véve  $\varphi_{21\min} \leq \varphi_{21} \leq \varphi_{21\max}$ .

#### 4.1.3. Gömbi koordinátarendszerű robot (RRT)

A robotkarokat összekapcsoló kinematikai kényszerek közül a rotációs mozgást megvalósítók tengelyei merőlegesek és metszik egymást. Ugyanezen metszésponton átmegy a translációs mozgás és így képződik a gömbi koordináta rendszer. A robot felépítését a 4.6. ábra, jelképi jelölésű modelljét pedig a 4.7. ábra mutatja.



4.6. ábra



4.7. ábra

A TCP pont mozgását leíró összefüggések a 4.7. ábra alapján:

$$\begin{aligned}
 x &= (\ell_{4 \min} + s_{43}) \cos \varphi_{32} \cos \varphi_{21}, \\
 y &= (\ell_{4 \min} + s_{43}) \cos \varphi_{32} \sin \varphi_{21}, \\
 z &= \ell_2 + \ell_3 + (\ell_{4 \min} + s_{43}) \sin \varphi_{32}.
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

A 4.7. ábra szerint e robotosztálynál a  $\varphi_{32}$ -re a  $\varphi_{32 \min} \leq \varphi_{32} \leq \varphi_{32 \max}$  korlátozás érvényes. Az  $s_{43}(t)$ ,  $\varphi_{21}(t)$  és a  $\varphi_{32}(t)$  kinematikai elő-írásokkal (4.4) egyenletek időfüggvényekké írhatók át:

$$\begin{aligned}
 x(t) &= [\ell_{4\min} + s_{43}(t)] \cos \varphi_{32}(t) \cos \varphi_{21}(t), \\
 y(t) &= [\ell_{4\min} + s_{43}(t)] \cos \varphi_{32}(t) \sin \varphi_{21}(t), \\
 z(t) &= \ell_2 + \ell_3 + [\ell_{4\min} + s_{43}(t)] \sin \varphi_{32}(t).
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

#### 4.1.4. Csuklóskaros robotok

A csuklóskaros robotok karjait egymáshoz kapcsoló kinematikai kényszerek rotációs mozgást tesznek lehetővé. A kényszerek közül kettő tengelye egymásra merőleges és metszi egymást, míg a harmadik az előző kettő valamelyikével párhuzamos. A párhuzamos kényszerek tengelyének iránya szerint lehet értelmezni a

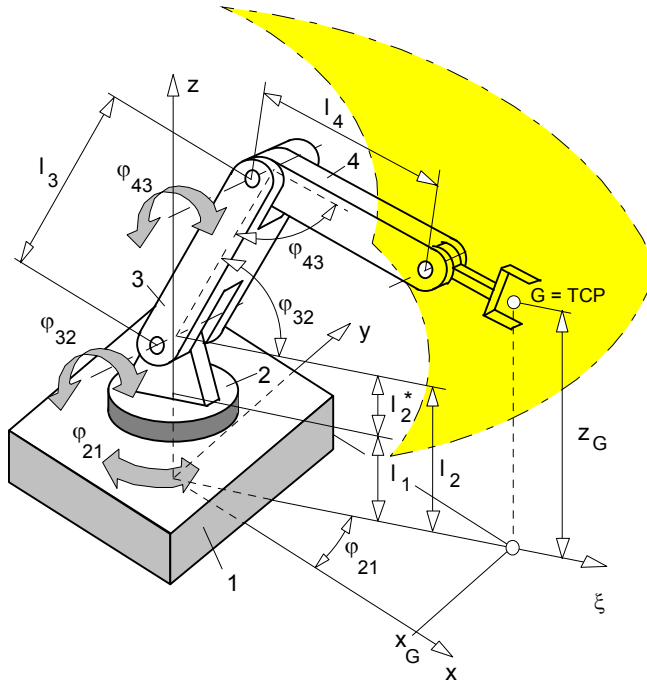
- függőleges síkú és a
- vízszintes síkú

csuklóskaros robotokat.

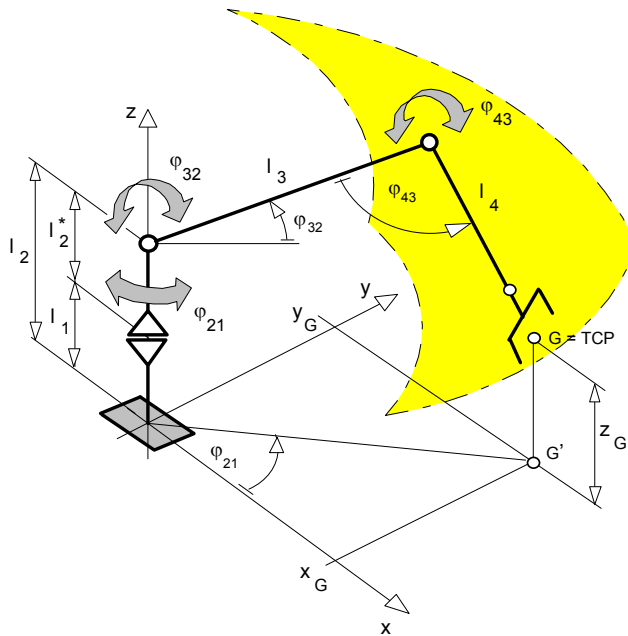
##### a) Függőleges síkú csuklóskaros robotok (RRR)

E robottípusnál egy kinematikai kényszer tengelye függőleges irányú, a másik kettő pedig vízszintes, ez az elrendezés biztosítja a robot függőleges síkú mozgását. A robot felépítését és a világ koordináta-rendszerben való elhelyezését a 4.8. ábra mutatja. A robot jelképi modellje a 4.9. ábrán látható.

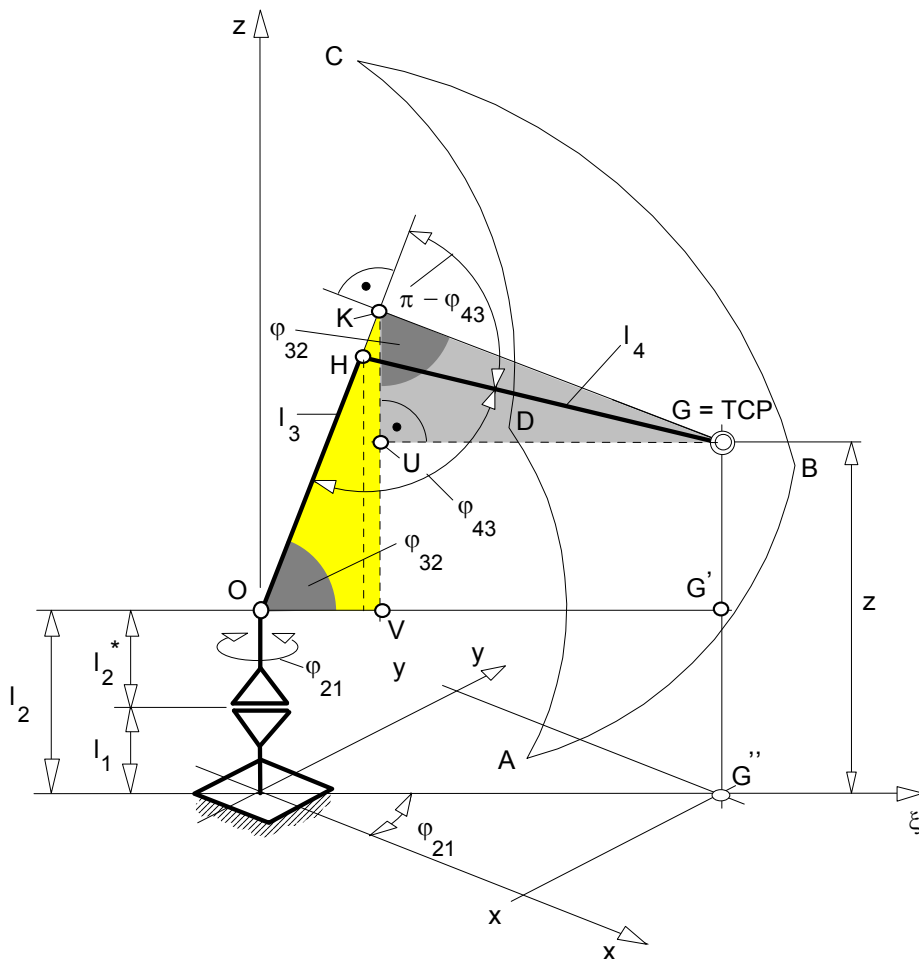
A csuklóskaros robot szerszám-középpontjának leírásához a 4.9. ábrát kissé alakítsuk át, és a robot világkoordináta-rendszerében tekintsük a robotmozgás egy meridián síkját realizáló z-ξ koordináta-rendszert (4.10. ábra).



4.8. ábra



4.9. ábra



4.10. ábra

A 4.10. ábrán lévő geometriai értelmezések alapján a  $z$ - $\xi$  koordináta-rendszerben a TCP pont helyzetét a

$$\xi = (\ell_3 + \overline{HK})\cos\varphi_{32} + \overline{KG}\sin\varphi_{32}, \quad (4.6)$$

$$z = \ell_2 + (\ell_3 + \overline{HK})\sin\varphi_{32} - \overline{KG}\cos\varphi_{32}$$

összefüggések írják le. A HKG derékszögű háromszögből

$$\overline{HK} = \ell_4 \cos(\pi - \varphi_{43}) = -\ell_4 \cos \varphi_{43}, \quad (4.7)$$

illetve

$$\overline{KG} = \ell_4 \sin \varphi_{43} \quad (4.8)$$

összefüggések adódnak. (4.7) és (4.8) (4.6)-ba helyettesítésével a szerszám-középpont helyzetét leíró egyenletek

$$\xi = (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \cos \varphi_{32} + \ell_4 \sin \varphi_{43} \sin \varphi_{32}, \quad (4.9)$$

$$z = \ell_2 + (\ell_3 + \ell_4 \sin \varphi_{43}) \sin \varphi_{32} - \ell_4 \sin \varphi_{43} \cos \varphi_{32}$$

alakúvá válnak, ahol  $\ell_2, \ell_3, \ell_4$  a robotok geometriai méretei,  $\varphi_{43}$  és  $\varphi_{32}$  pedig a karmozgás kinematikai előírásai. Mivel (4.9) csak a robot meridián síkbeli mozgását írja le, elegendő a két független kinematikai előírás.

A TCP pont világkoordináta-rendszerbeli helyzetét (4.9)-ből a 4.10. ábrán lévő értelmezések alapján az

$$x = [(\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \cos \varphi_{32} + \ell_4 \sin \varphi_{43} \sin \varphi_{32}] \cos \varphi_{21},$$

$$y = [(\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \cos \varphi_{32} + \ell_4 \sin \varphi_{43} \sin \varphi_{32}] \sin \varphi_{21},$$

$$z = \ell_2 + (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \sin \varphi_{32} - \ell_4 \sin \varphi_{43} \cos \varphi_{32}.$$

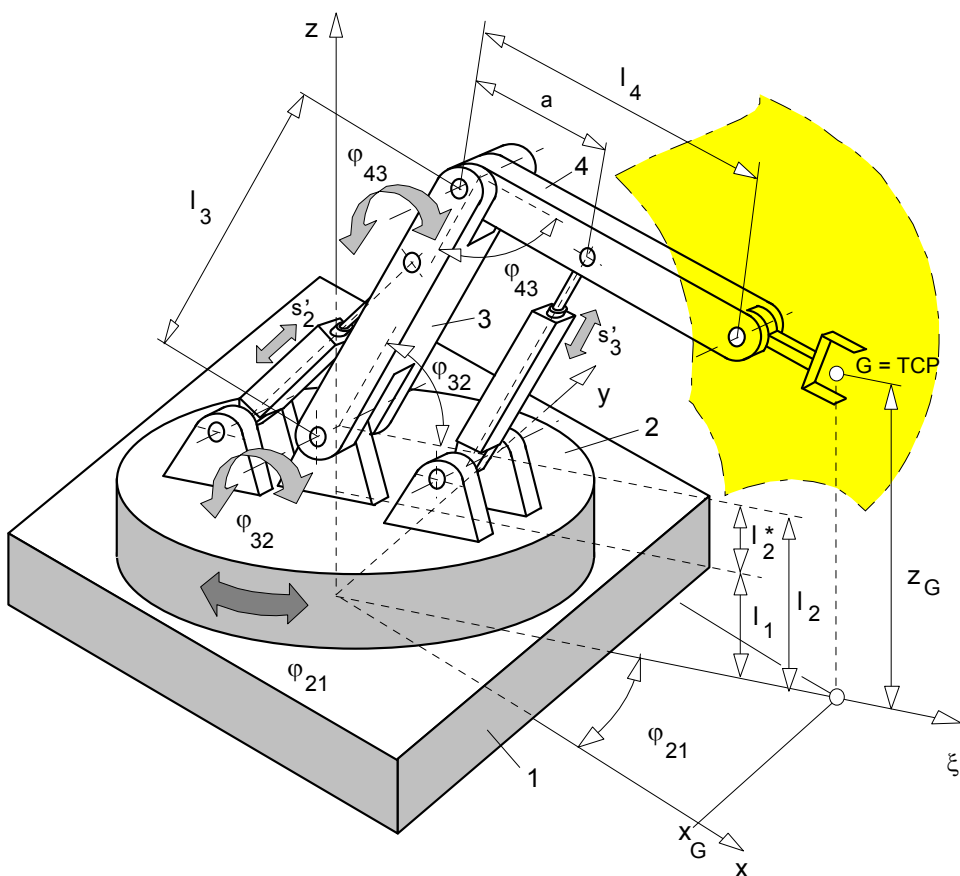
(4.10)

egyenletek írják le, ahol már három független kinematikai előírás szükséges:  $\varphi_{21}$ ,  $\varphi_{32}$ , és  $\varphi_{43}$ .

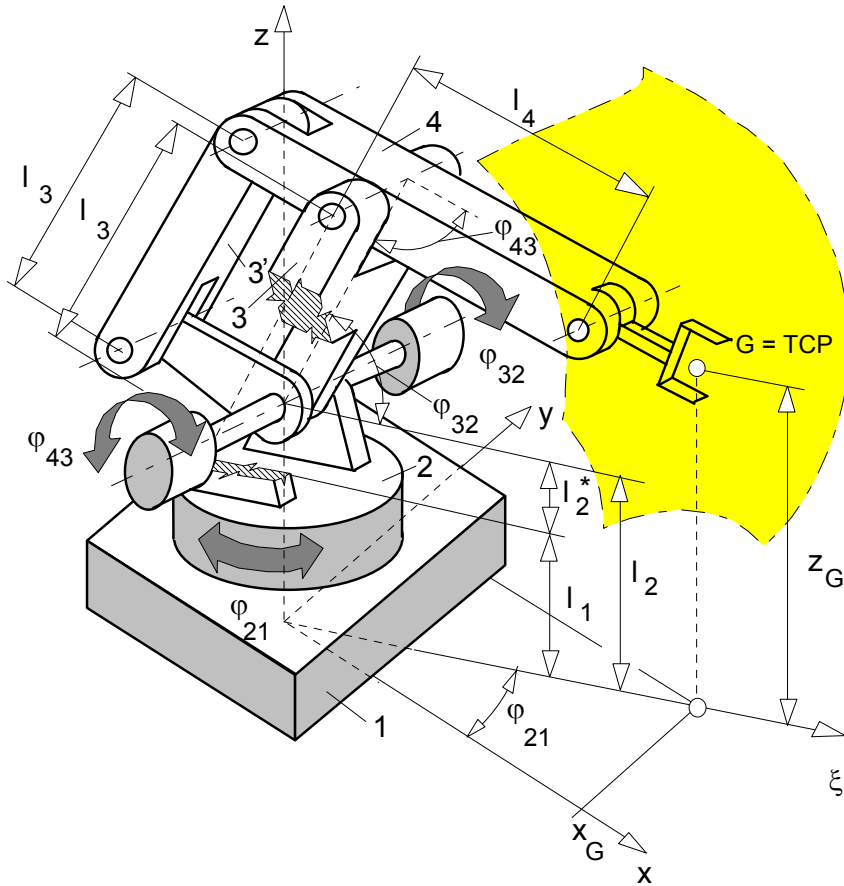
Az eddigiekben nem volt szó a kinematikai előírások realizálásáról. Az eddigi robot osztályoknál a gyakorlatban is az terjedt el, hogy a kinematikai előírásokat a kinematikai kényszerekben működtetett közvetlen hajtásokkal valósították meg. A csuklókaros robotok között több olyan típus is található, ahol egy kar (általában a 4 jelű) kinematikai előírását nem a kényszer csukló pontban közvetlen hajtással, hanem közvetett módon - hidraulikus henger



hozzákapcsolásával, vagy áttételi rudazattal - biztosítják. Ezekre a megoldásokra látható példa a 4.11- és a 4.12. ábrákon. A 4.11. ábrán vázolt robottípust a továbbiakban B-típusnak a 4.12. ábrán lévő pedig C-típusnak nevezzük.

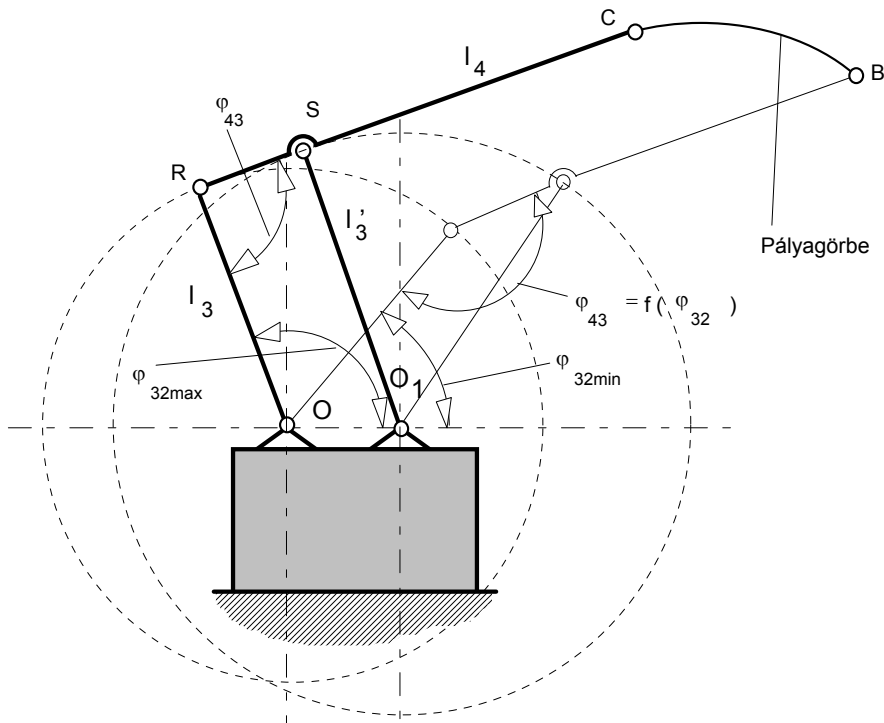


4.11. ábra



4.12. ábra

A továbbiakban azt nézzük meg, hogy a közvetett hajtási módok hogyan befolyásolják a tényleges kinematikai előírásokat. Ehhez induljunk ki a 4.13. ábrából, amely a 4.11. ábra robotmodelljének konkretizálása arra az esetre, amikor a 4. karmozgató hidraulikus henger nem mozog. Mozgassuk így a 3. karmozgatót és vele együtt a robotot a  $\varphi_{32\max}$  helyzetből a  $\varphi_{32\min}$  (vékonyan rajzolt) helyzetbe és megállapíthatjuk, hogy  $\varphi_{43} = f(\varphi_{32})$ . Ezáltal könnyen beláthatjuk,

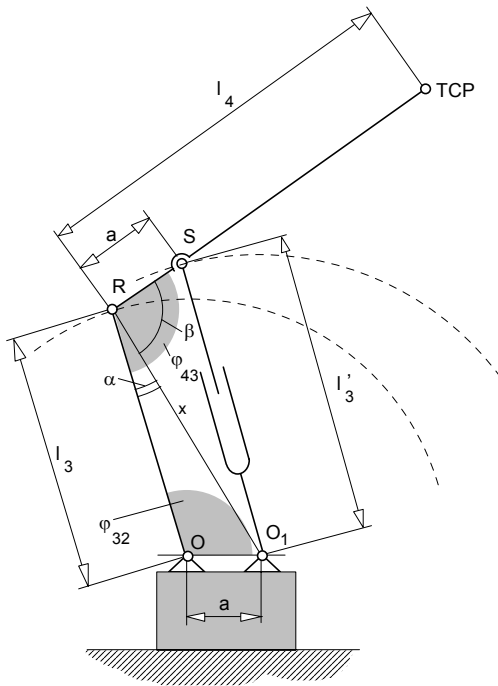


4.13. ábra

hogy a B-típusú robot TCP pontjának pályája a 4 kar mozgató hidraulikus henger mozgásának megállításával más pályagörbét ír le, mint a 4.9. ábrán lévő ún. A-típusú robot a 4 jelű karját közvetlenül mozgató hajtóegység megállítása esetén. A gyakorlati feladatok során azonban követelmény, hogy mindkét robottípussal ugyanazon pályagörbét kell előállítani. A továbbiakban ennek a lehetőségét nézzük meg a kinematikai geometria segítségével. A 4.14. ábra egy általános helyzetben mutatja a robot karokat és a 4 kar közvetett hajtásaként funkcionáló hidraulikus hengert. Ezt a helyzetet az  $ORO_1$  és az  $O_1RS$  háromszögekkel tudjuk jellemezni. A háromszögekben megtalálhatók közvetlenül vagy közvetetten a  $\varphi_{32}$  és a  $\varphi_{43}$  kinematikai előírások, ahol  $\varphi_{43} = \alpha + \beta$ .

Az  $ORO_1$  háromszögből szinusz és koszinusz tételek alkalmazásával

$$\sin \alpha = \frac{a \sin \varphi_{32}}{x} = \frac{a \sin \varphi_{32}}{\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}} \quad (4.11)$$



4.14. ábra

illetve az  $O_1RS$  háromszögből koszinusz tétel felhasználásával

$$\cos \beta = \frac{\ell_3^2 + 2a^2 - \ell_3'^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}{2a\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}} \quad (4.12)$$

egyenletek adódnak, amelyből

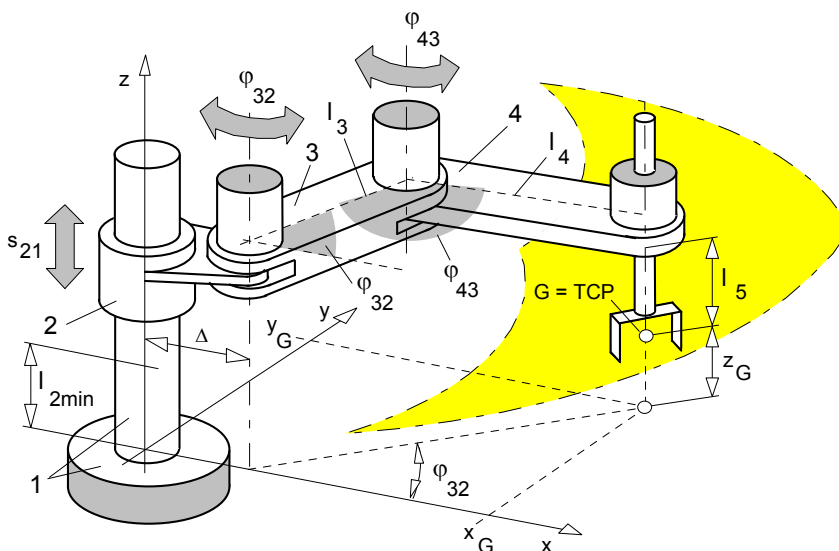
$$\begin{aligned} \varphi_{43} = & \arcsin \frac{a \cdot \sin \varphi_{32}}{\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}} + \\ & + \arccos \frac{\ell_3^2 + 2a^2 - \ell_3'^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}{2a\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

összefüggést nyerjük.

(4.13) összefüggésből látható, hogy a tényleges hajtást megvalósító hidraulikus henger hosszának állandósága ( $\ell_3 = \text{const}$ ) esetén  $\varphi_{43} = g(\varphi_{32})$  illetve  $\varphi_{43}(t) = g[\varphi_{32}(t)]$ . Abban az esetben, ha  $\ell_3 \neq \text{const}$  akkor  $\varphi_{43} = f(\varphi_{32}, \ell_3)$  illetve  $\varphi_{43}(t) = f[\varphi_{32}(t), \ell_3(t)]$ , ahol  $\varphi_{32}(t)$  és  $\ell_3(t)$  már fizikailag is realizálható kinematikai előírások. Amennyiben a TCP pont pályájának (vagy helyzetének) leírásához  $\varphi_{32}$  és  $\varphi_{43}$  szög-koordinátákat meg tudjuk határozni (lásd 5. fejezet), akkor a (4.13) összefüggés segítségével a közvetett hajtást realizáló hidraulikus henger hosszának  $\ell_3$  pillanatnyi értéke kiszámítható.

### b) Vízszintes síkú csuklókaros robotok

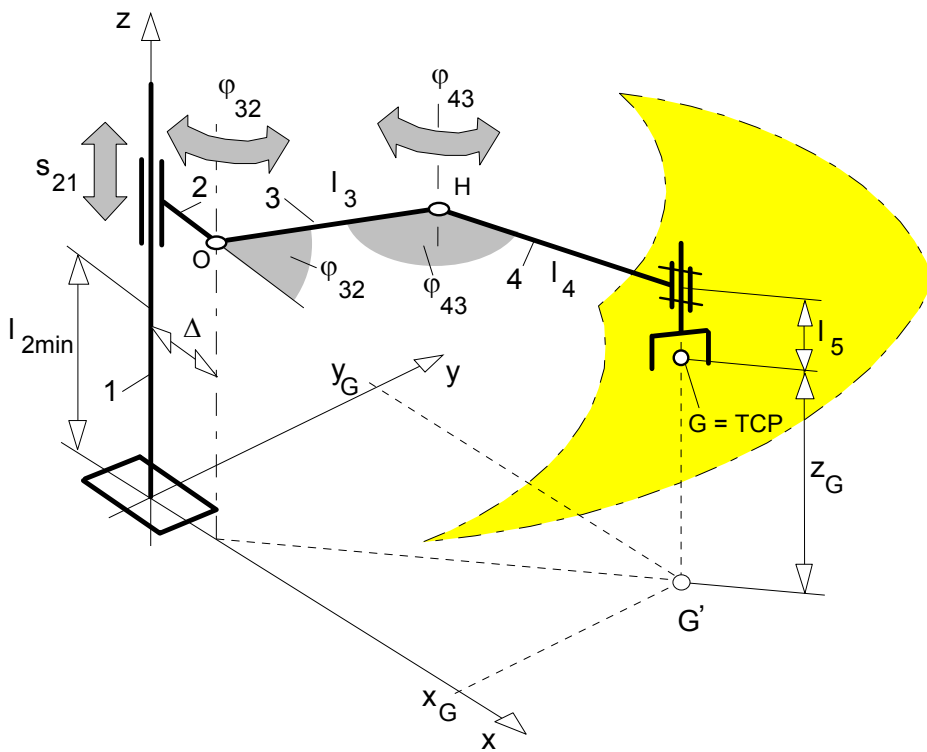
A robot felépítését és a világkoordináta-rendszerét a 4.15. ábra mutatja. Az ábrából látható, hogy a robotkarokat egymáshoz kapcsoló kinematikai kényszerek tengelye függőleges, amellyel az emberi kar vízszintes síkú mozgása képezhető le (a váll és a könyök ízület).



4.15. ábra

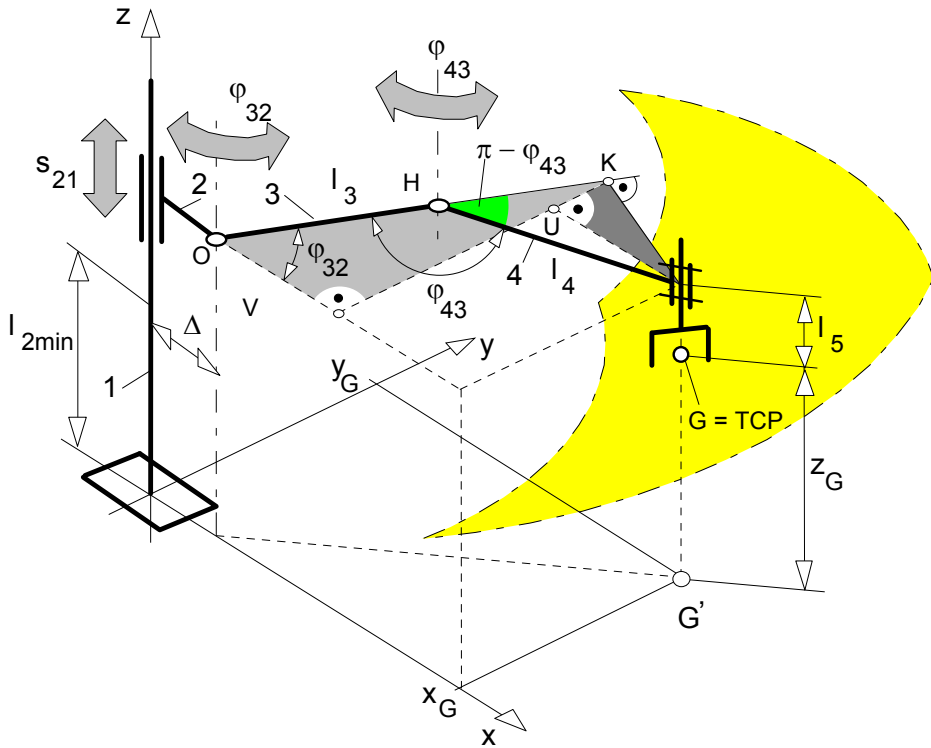
E két kényszerrel csak egy síkmozgás képezhető le. Mivel a robotoknál követelmény a térbeli mozgás realizálása, ezért felépítésében kiegészül egy szintén függőleges irányú mozgást lehetővé tevő transzlációs kényszerrel. Ezzel a kényszerrel TRR vagy RRT robotstruktúra is képezhető. Az anyagmozgatási egységakományozási feladatokhoz a TRR struktúrák terjedtek el, a szerelési anyagkezelési feladatokhoz inkább az RRT struktúrákat alkalmazzák. Mindkét struktúra esetében a robot mozgását, illetve mozgástartományát meghatározó kényszerek az RR kényszerek, ezért tárgyaljuk a csuklókaros robotok osztályában.

A vízszintes síkú csuklókaros robot egy TRR jelképi modelljét a 4.16. ábra mutatja. A TCP pont leírásához itt is



4.16. ábra

alakítsuk át a 4.16. ábrát. Az átalakított új ábra (4.17. ábra) alapján a TCP pont világkoordináta-rendszerben lévő helyzete



4.17. ábra

$$x = \Delta + (\ell_3 + \overline{HK}) \cos \varphi_{32} + \overline{KG} \sin \varphi_{32},$$

$$y = (\ell_3 + \overline{HK}) \sin \varphi_{32} - \overline{KG} \cos \varphi_{32}, \quad (4.14)$$

$$z = \ell_{2\min} + s_{21} - \ell_5$$

egyenletekkel írható le. A HKG" derékszögű háromszögből a 4.14. a.) fejezetpontban tett (4.7) alatti értelmezése

$$\overline{HK} = -\ell_4 \cos \varphi_{43} \quad (4.15)$$

és

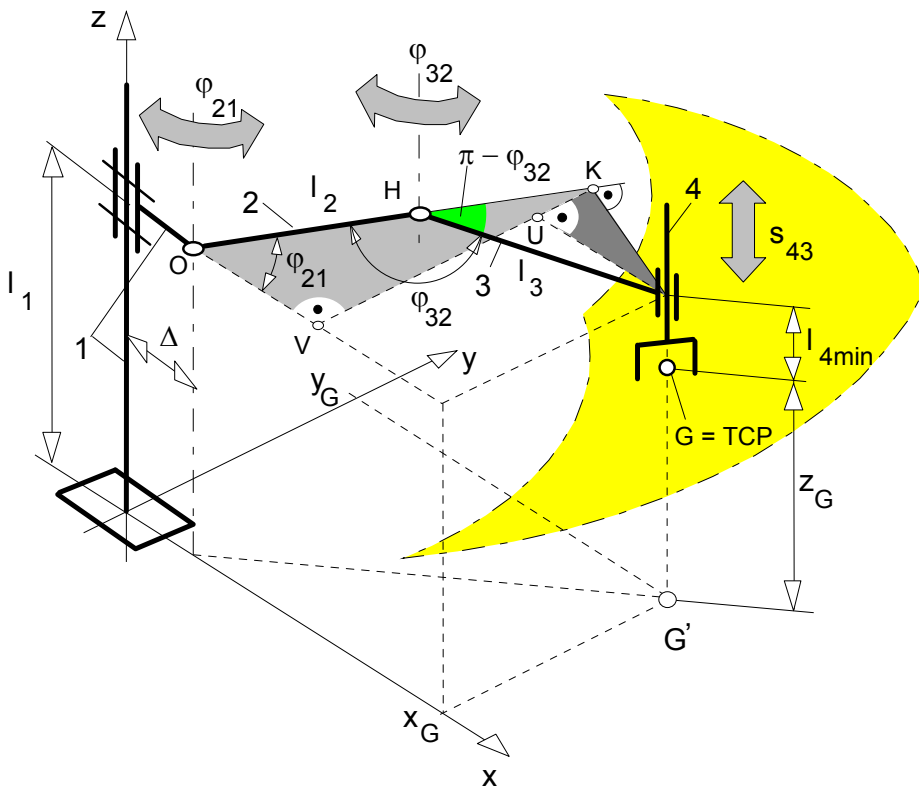
$$\overline{KG} = \ell_4 \sin \varphi_{43} \quad (4.16)$$

összefüggések határozhatók meg, amelyeket (4.14)-be helyettesítve:

$$\begin{aligned}
 x &= \Delta + (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \cos \varphi_{32} + \ell_4 \sin \varphi_{43} \sin \varphi_{32}, \\
 y &= (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \sin \varphi_{32} - \ell_4 \sin \varphi_{43} \cos \varphi_{32}, \\
 z &= \ell_{2\min} + s_{21} - \ell_5
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

alakú egyenletekhez jutunk. (4.17)-ből látható, hogy a TCP pont helyzetét az  $s_{21}$ , a  $\varphi_{32}$  és a  $\varphi_{43}$  kinematikai előírás egyértelműen meghatározza, mivel  $\Delta, \ell_{2\min}, \ell_3, \ell_4$  és  $\ell_5$  itt is a robot szerkezeti méreteit jellemzik.

A levezetések mellőzésével a 4.18. ábrán lévő RRT struktúra esetén a TCP pont világkoordináta-rendszerbeli helyzete az



4.18. ábra



$$\begin{aligned}
 x &= \Delta + (\ell_2 - \ell_3 \cos \varphi_{32}) \cos \varphi_{21} + \ell_3 \sin \varphi_{32} \sin \varphi_{21}, \\
 y &= (\ell_2 - \ell_3 \cos \varphi_{32}) \sin \varphi_{21} - \ell_3 \sin \varphi_{32} \cos \varphi_{21}, \\
 z &= \ell_1 - \ell_{4 \min} - s_{43}
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

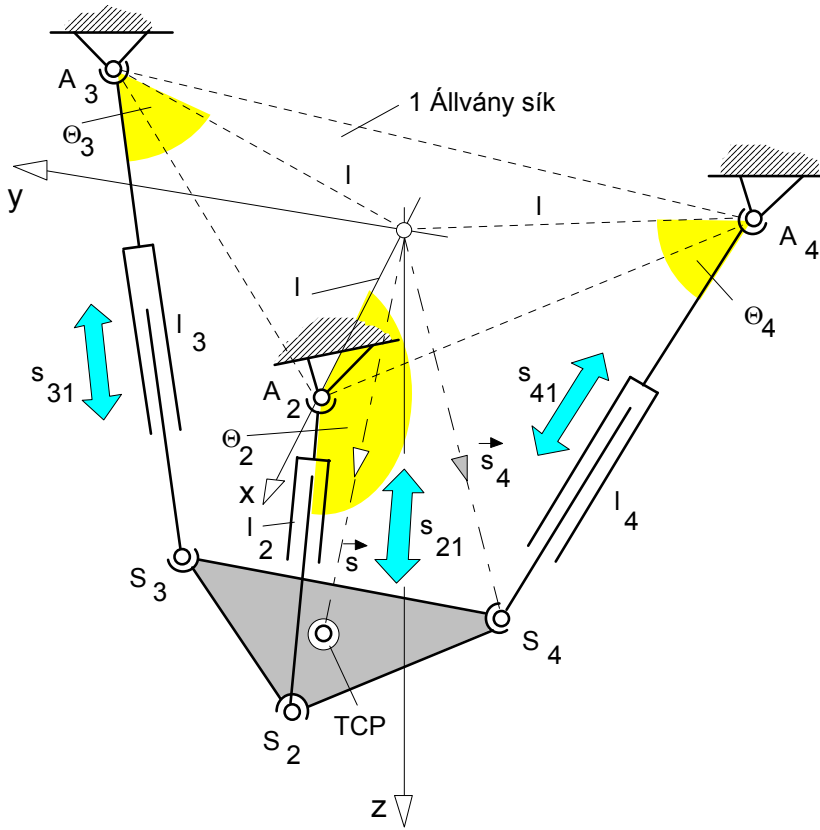
összefüggések határozzák meg.

#### 4.1.5. Robotplatformok lineáris (transzlációs) mozgásokból

Az eddigi fejezetekben vizsgált robot osztályoknál a TCP pont helyzetét a karok nagy elmozdulásai vagy szögelfordulásai alapján lehetett meghatározni. A mozgások során általában nagy kartömegeket kellett mozgatni, ami egyéb jellemzők mellett befolyással volt a robot mozgásának pontosságára. A pontosság javítására irányuló fejlesztési célkitűzések vezettek a különböző lineáris mozgásokból felépülő robot platformok létrehozásához. A fenti elvre épülő SEF TRICEPT típusú robot felépítését a 4.19. ábra mutatja, jelképi modellje pedig a 4.20. ábrán látható.



4.19. ábra



4.20. ábra

A 4.20. ábrán megfigyelhető, hogy a transzlációs mozgások nem ortogonális elhelyezésűek. A mozgásokat megvalósító lineáris hajtások mindegyike rögzített az állványhoz, illetve a TCP pontot hordozó platformhoz. A hajtások állványhoz való kapcsolásának a kényszerei egy egyenlő oldalú háromszög csúcspontjaiban helyezkednek el. Az ábra alapján a platform csuklópontjainak helyzetét

$$x_{S2} = \ell - \ell_2 \cos \Theta_2,$$

$$y_{S2} = 0, \quad (4.19)$$

$$z_{S2} = \ell_2 \sin \Theta_2,$$

$$\begin{aligned}
 x_{S3} &= -(\ell - \ell_3 \cos \Theta_3) \sin 30^\circ = -\frac{1}{2}(\ell - \ell_3 \cos \Theta_3), \\
 y_{S3} &= (\ell - \ell_3 \cos \Theta_3) \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}(\ell - \ell_3 \cos \Theta_3), \quad (4.20)
 \end{aligned}$$

$$z_{S3} = \ell_3 \sin \Theta_3$$

illetve

$$\begin{aligned}
 x_{S4} &= -(\ell - \ell_4 \cos \Theta_4) \sin 30^\circ = -\frac{1}{2}(\ell - \ell_4 \cos \Theta_4), \\
 y_{S4} &= (\ell - \ell_4 \cos \Theta_4) \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}(\ell - \ell_4 \cos \Theta_4), \quad (4.21)
 \end{aligned}$$

$$z_{S4} = \ell_4 \sin \Theta_4$$

egyenletekkel lehet leírni. A koordináták ismertében a TCP pont helyzetét egyszerű geometriai összefüggésekkel meg lehet határozni.

A számításhoz térjünk át a vektortérbe, ahol a platform csúcspontjaiba mutató vektorok (4.19), (4.20) és (4.21) skalárkoordináták alapján

$$\mathbf{s}_2 = \begin{bmatrix} \ell - \ell_2 \cos \Theta_2 \\ 0 \\ \ell_2 \sin \Theta_2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{s}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(\ell - \ell_3 \cos \Theta_3) \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(\ell - \ell_3 \cos \Theta_3) \\ \ell_3 \sin \Theta_3 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

illetve

$$\mathbf{s}_4 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(\ell - \ell_4 \cos \Theta_4) \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(\ell - \ell_4 \cos \Theta_4) \\ \ell_4 \sin \Theta_4 \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Mivel a TCP pontot a platform súlypontjába helyeztük el, a súlypont koordinátáit az

$$\mathbf{s} = \frac{\mathbf{s}_2 + \mathbf{s}_3 + \mathbf{s}_4}{3} \quad (4.25)$$

vektoregyenlet írja le, amelyből (4.22), (4.23) és (4.24) felhasználásával megkapjuk a kifejtett alakot

$$\mathbf{s} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \ell - \ell_2 \cos \Theta_2 - \frac{1}{2}(2\ell - \ell_3 \cos \Theta_3 - \ell_4 \cos \Theta_4) \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(2\ell - \ell_3 \cos \Theta_3 - \ell_4 \cos \Theta_4) \\ \ell_2 \sin \Theta_2 + \ell_3 \sin \Theta_3 + \ell_4 \sin \Theta_4 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

vagy az összevonások elvégzésével az

$$\begin{aligned} x &= -\frac{1}{3} \left[ \ell_2 \cos \Theta_2 - \frac{1}{2}(\ell_3 \cos \Theta_3 + \ell_4 \cos \Theta_4) \right], \\ y &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \ell - \frac{1}{2}(\ell_3 \cos \Theta_3 + \ell_4 \cos \Theta_4) \right], \\ z &= \frac{1}{3}(\ell_2 \sin \Theta_2 + \ell_3 \sin \Theta_3 + \ell_4 \sin \Theta_4) \end{aligned} \quad (4.27)$$

skalárkomponenseket. A TCP pont a platform súlypontján kívül is elhelyezhető. Szerkezeti megoldások miatt a gyakorlatban ez terjedt el. Ilyen esetben a (4.26) által meghatározott pont fölé a platform síkjától a szerkezeti méret által meghatározott távolságban képezzük az új szerszámközpontot.

Ha statikailag megvizsgáljuk a 4.20. ábra robotmodelljét azt tapasztaljuk, hogy  $s_{21} = s_{31} = s_{41} = \text{const}$  esetén statikailag határozott. A bizonyítás mellőzésével  $s_{21} = s_{21}(t)$ ,  $s_{31} = s_{31}(t)$  és  $s_{41} = s_{41}(t)$  kinematikai előírások esetén a platform kinematikailag is határozott. Ez azt jelenti, hogy a TCP pont helyzete  $s_{21}$ ,  $s_{31}$  és  $s_{41}$  kinematikai előírásokkal meghatározható, ha (4.27)-be

$$\ell_2 = \ell_{2\min} + s_{21},$$

$$\ell_3 = \ell_{3\min} + s_{31}, \quad (4.28)$$

$$\ell_4 = \ell_{4\min} + s_{41}$$

összefüggéseket helyettesítjük. A behelyettesítés után, - mivel  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  és  $\Theta_4$  szögek ismeretlenek, úgy tűnik, hogy (4.27)-ben a TCP pont helyzetét hat változó határozza meg, aminek az ellenkezőjét állítottuk. E határozatlanságot a 4.20. ábra geometriáját figyelembe véve az

$$|s_3 - s_2| = |s_4 - s_3| = |s_2 - s_4| \quad (4.29)$$

feltétellel lehet feloldani. Tehát korábbi állításunkat azzal kell kiegészíteni, hogy a TCP pont helyzetét (4.27) összefüggések írják le (4.29) feltételek teljesülése esetén.

#### 4.1.6. A robottechnika mechanizmuselméleti kérdései

A 3.3. fejezetpontban már szó volt róla, hogy a robotmechanika egy olyan gépszerkezet, amely az emberi kar mozgásait és munkavégzési mozgásciklusát képezi le. A gépszerkezet mechanikai testek kinematikai kényszerekkel való egymáshoz kapcsolásával épül fel. A robotmechanika tehát láthatóan kétféle alkotóelemet tartalmaz:

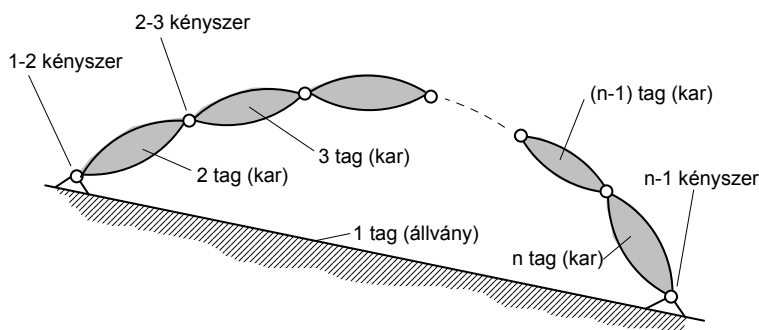
- karokat (tagokat),
- kényszereket.

A kényszerek meghatározzák a tagok egymáshoz viszonyított mozgását.

*Releaux* megfogalmazása szerint az olyan szerkezetek, amelyek kétféle elemet, tagokat és kényszereket tartalmaznak és a szerkezet ezen elemek kombinációjából jön létre mechanizmusnak nevezzük. A robotmechanika - mint az eddigiekben látható volt megfelel e felépítési elvnek - tehát egy térbeli mechanizmus, amelyben a tagok kapcsolódása láncszerű. Láncszerű kapcsolódásról akkor beszélünk, ha a kapcsolódó testek (karok) olyan sorozatot alkotnak, amelyben az első karhoz a második, a másodikhoz a harmadik, a harmadikhoz a negyedik stb. kapcsolódik egy-egy kényszer segítségével. Ebben az alakzatban minden tag (kar) csak az öt sorrendben megelőzővel, illetve a közvetlenül követővel van kényszer-kapcsolatban. A

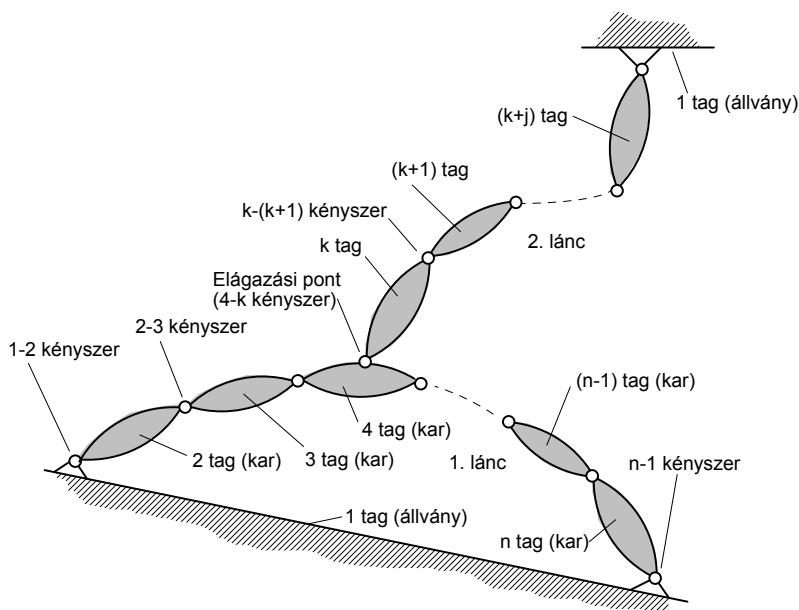
mechanizmuselmélet a testeknek ezt a láncszerű kapcsolódási (kapcsolási) rendszerét kinematikai láncnak nevezi. Magát az eljárást pedig láncképzésnek nevezzük.

Amennyiben egy kinematikai lánc kezdő- és záró tagja ugyanazon merev test zárt láncsal van dolgunk (4.21. ábra), amely egy egyláncú mechanizmust ábrázol.



4.21. ábra

Az egyláncú mechanizmusok bővítéssel több láncúvá alakíthatók. A bővítés a láncképzés elve szerint történik, úgy hogy az egyláncú mechanizmus valamelyik tagjához további tagokat kapcsolunk (4.22. ábra)



4.22. ábra

Azokat a kényszereket, ahol az újabb lánc az eredetihez kapcsolódik elágazási pontoknak nevezzük. Egy mechanizmusban a láncok és az elágazási pontok száma között általános érvényű összefüggés van, amely

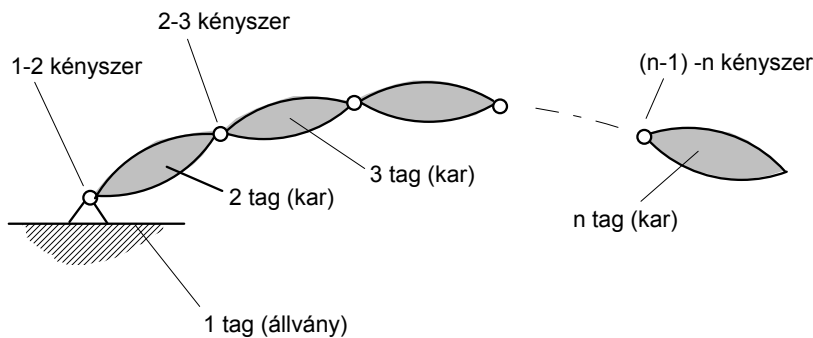
$$r = 2(m - 1) \quad (4.30)$$

vagy

$$m = \frac{r}{2} + 1, \quad (4.31)$$

alakban fejezhető ki. (4.30) és (4.31) összefüggésekben  $m$  jelenti a kinematikai láncok számát,  $r$  pedig az elágazási pontok számát. A láncok száma a mechanizmus szerkezeti jellemzője.

Azokat a mechanizmusokat, amelyeknek a záró tagja nem az állvány, nyitott kinematikai láncú mechanizmusoknak nevezzük, amelyre egy példát a 4.23. ábra mutat. Az ábrán lévő szerkezet



4.23. ábra

egyetlen láncot tartalmaz.

A kinematikai láncok megismerése után nézzük meg a kényszerek a mechanizmusban betöltött szerepét. A mechanika szerint egy test akkor áll kényszer hatása alatt, ha a helyzetét meghatározó koordináták nem vehetnek fel tetszőleges értéket, hanem közöttük meghatározott törvényszerűségek



állnak fenn. Ha a test mozgását meghatározó koordinátákat  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$  -nel jelöljük akkor a közöttük fennálló törvényszerűségeket

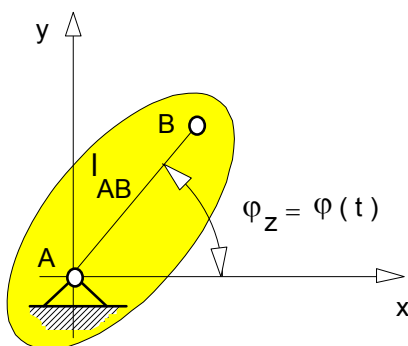
$$f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0 \quad (4.32)$$

vagy

$$f(q_1, q_2, \dots, q_n, t) = 0 \quad (4.33)$$

alakban tudjuk kifejezni, amit kényszeregyenleteknek nevezünk. A (4.32) és (4.33) geometriai kényszereket határoznak meg.

A kényszerek egymáshoz kapcsolódó merev testek vonatkozásában mozgáskorlátozó szerepet töltenek be. Ez azt jelenti, hogy a mozgások egy csoportját kizárja (lehetetlenné teszi), egy másik csoportját pedig engedélyezi. Ennek jobb megértésére tekintsük a 4.24. ábrán lévő merev testet, amelyet az  $A$  pontjában egy



4.24. ábra

csuklóval rögzítünk. A csukló csak a  $z$  tengely körüli elfordulást teszi lehetővé. Az ábra jelöléseit figyelembe véve a merev test kényszeregyenletei

$$\begin{aligned}
 q_1 &= x_A = 0, \\
 q_2 &= y_A = 0, \\
 q_3 &= z_A = 0, \\
 q_4 &= \varphi_x = 0, \\
 q_5 &= \varphi_y = 0, \\
 q_6 &= \varphi_z = \varphi(t).
 \end{aligned}
 \tag{4.34}$$

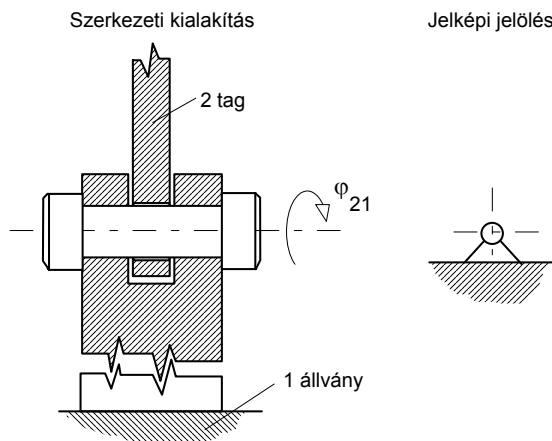
A kényszer mozgáskorlátozó szerepe tehát abban nyilvánul meg, hogy a hat koordináta közül csak egyet, a  $\varphi_2$ -t hagyja szabadon. A szabadon maradt koordináták számát a kényszer szabadságfokának nevezzük, ami a példánkban egy, tehát az A csukló egy szabadságfokú.

A robotmechanikákban alkalmazott kényszerek általában egy szabadságfokúak. Konstrukciójukban és kialakításukban az alábbi típusokat lehet megkülönböztetni:

- csukló,
- csúszka vagy egyenesbe vezetés,
- forgó csúszka vagy forgó egyenesbe vezetés.

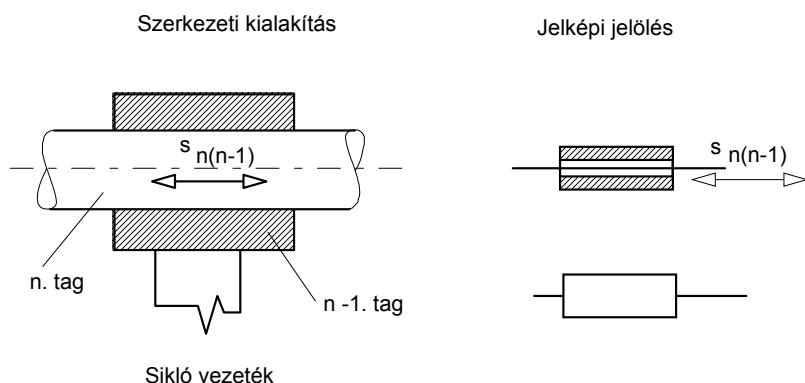
A két kényszer összekapcsolásával egy újabb két szabadságfokú kényszer lehet létrehozni, amelyet a szakirodalom forgó csúszka vagy forgó egyenesbe vezetés elnevezéssel illet.

A csukló szerkezeti kialakítását és jelképi jelölését a 4.25. ábra mutatja. Az egymáshoz kapcsolódó merev testeket egy csap vagy tengely segítségével köti egymáshoz. A tengely a merev testekben csapágyazott, ezáltal lehetővé válik a testek tengely körüli elfordulása.

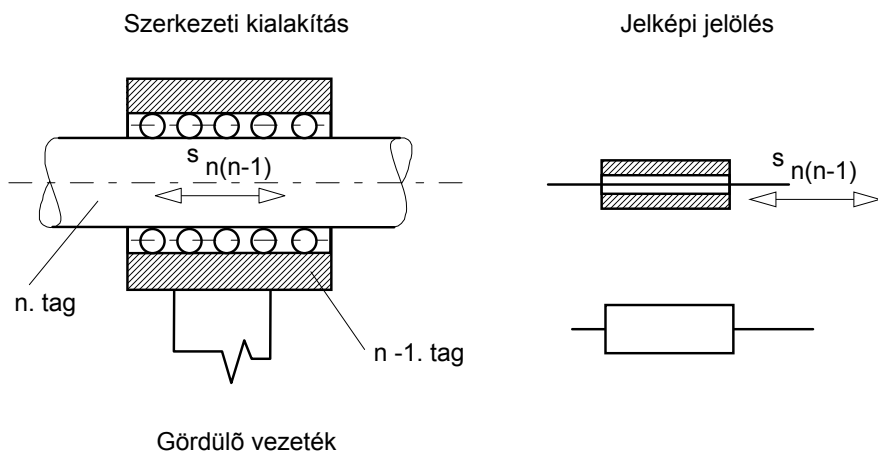


4.25 ábra

A csúszka vagy egyenesbe vezetés szerkezeti kialakítása és jelképi jelölése a 4.26. ábrán látható. Az egyenesbe vezetést itt sikló csapágyazású körvezeték biztosítja. A kapcsolódó merev testek a siklócsapágyat tartalmazó agy, és a körvezeték. A korszerű megoldások közé tartozik a 4.27. ábrán lévő ún. gölyös vezeték. Mindkét esetben a kapcsolódó merev testeknek csak a körvezeték irányú mozgást engedélyezett, szabadságfoka egy.

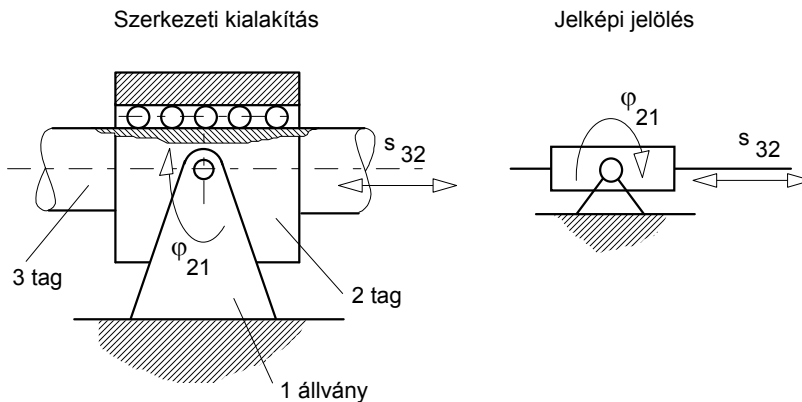


4.26. ábra



4.27. ábra

A forgó csúszka (forgó egyenesbe vezetés) szerkezeti kialakítását és jelképi jelölését a 4.28. ábra mutatja. Funkciójában a csukló



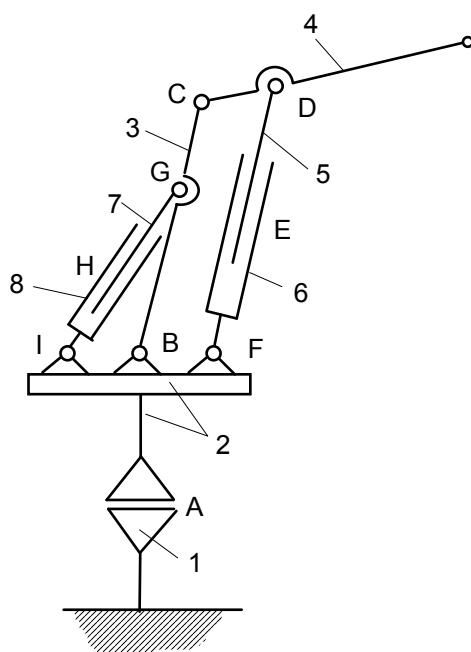
4.28. ábra

és az egyenesbe vezetés sorba kapcsolásának egy szerkezeti egységben való realizálása, tehát három merev test két kényszerrel való összekapcsolásának eredményeként jön létre. A forgócsúszka szabadságfoka  $2 \times 1 = 2$ .

A 4.1.1 - 4.1.5. fejezetpontokban a robot jelképi jelöléseken láthattuk, hogy a karokat (tagokat) számmal, a kényszereket pedig nagy betűvel jelöltük. A tagok közül a robotnak a világkoordináta-rendszerben rögzített szerkezeti egységét 1-el jelöltük ezt a továbbiakban állványnak nevezzük.

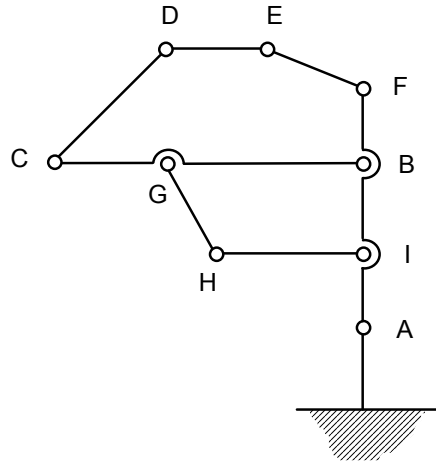
A robot mechanikát, mint mechanizmust szerkezeti kialakítása szerint a kinematikai láncainak leírásával jellemezhetjük. Ehhez nézzük meg, hogy a robotmechanikákat a kinematikai láncok szerint hogyan tudjuk csoportosítani.

Tekintsük a 4.12. ábrán lévő B típusú robot jelképi modelljét, (4.29. ábra).



4.29. ábra

Az ábrából látható, hogy a robotmechanika több láncot tartalmaz. A kinematikai láncokat többféle képen értelmezhetjük, ugyanis a láncok száma független a láncképzés mikéntjétől. Ehhez szerkesszük át a 4.29. ábra modelljét a kinematikai láncképzés szempontjából, azaz a kényszerek funkcionális jellemzőit elhagyva egységesen kis körrel jelöljük azokat, a 4.30. ábrához jutunk. Ha a kezdőtagtól kiindulva a kényszereket láncenként felsoroljuk, megjelölve a láncok egymáshoz való kapcsolódását, akkor a mechanizmus (robotmechanika) szerkezeti felépítése a kényszerek ezen felsorolásával jellemezhető, amit szerkezeti képletnek nevezünk. A láncok egymáshoz való kapcsolását balra mutató nyíllal jelöljük.



4.30. ábra

A 4.30. ábra alapján a 4.29. ábra szerinti robotmechanikának az alábbi szerkezeti kialakításai lehetnek:

$$\begin{aligned} A \leftarrow BCDEF \leftarrow GHI, \\ A \leftarrow IHGB \leftarrow CDEF \end{aligned} \quad (4.35)$$

A szerkezeti képletből látható, hogy a robotmechanika három láncot tartalmaz, amelyből kettő záró taggal rendelkezik és az első pedig nyitott. A nyitott láncot az IBF kényszereket tartalmazó tag képezi, amely az A kényszerrel a világkoordináta-rendszerhez van rögzítve. A zárt láncok mindegyike az IBF kényszereken keresztül záródik a kényszereket tartalmazó tagon.

Mechanizmusok geometriai szabadságfoka általánosságban térbeli esetre, láncként a (4.36) alatti *Csebisev-Grübler-Kutzbach* formula alapján határozható meg, ahol  $N$  – az állványt is beleértve – a mechanizmus tagjainak száma,  $j$  a kényszerek száma,  $f_i$  pedig az egyes kényszerek geometriai szabadságfoka a  $g$ -edik láncre:

$$M_g = 6(N - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i. \quad (4.36)$$

Térbeli egyszerű zárt lánc –  $N = j$  – esetén a szabadságfok

$$M_g = \sum_{i=1}^j f_i - 6,$$

nyitott lánc esetén –  $N = j+1$  – pedig

$$M_g = \sum_{i=1}^j f_i .$$

A (4.36) síkbeli szerkezetre

$$M_g = 3(N-1-j) + \sum_{i=1}^j f_i , \quad (4.37)$$

egyszerű zárt láncra;

$$M_g = \sum_{i=1}^j f_i - 3 ,$$

nyitott láncra pedig

$$M_g = \sum_{i=1}^j f_i$$

alakokban írható fel. Az összetett lánc szabadságfoka a láncok szabadságfokának összegeként számítható:

$$M = \sum_{g=1}^m M_g$$

A (4.36)- és (4.37) –tel, illetve a belőlük származtatott összefüggésekkel jellemzett geometriai szabadságfokot a lánc rendszámának, vagy határozottsági fokának nevezzük. Az egyszerű és az összetett láncok  $M_g$ , illetve  $M$  határozottsági foka is  $0 \leq M_g$ , illetve  $M_g \leq 0$  értékű lehet. A gyakorlat számára az  $M_g < 0$  nem értelmezhető, ekkor a lánc túlhatározott, mert a geometriai kényszeregyenletek egymásnak ellentmondó feltételeket tartalmaznak. Az  $M_g = 0$  azt jelenti, hogy a kényszeregyenletekkel a lánc valamennyi szabad koordinátáját megkötjük. Az  $M_g > 0$  esetben a láncban szabad koordináták vannak, ilyenkor a láncot határozatlannak nevezzük.

Példaként nézzük meg a (4.35) szerkezeti képlet szerinti robotmechanika láncok határozottsági fokának számítását:

- az első szerkezeti képlet alapján számítva, valamennyi kényszer egy szabadságfokú:

$$A \leftarrow BCDEF \leftarrow GHI$$

$$M = 1 \cdot 1 + 5 \cdot 1 - 3 + 3 \cdot 1 - 3 = 1 + 2 + 0 = 3,$$

- a második szerkezeti képlet alapján elvégezve a számítást:

$$A \leftarrow IHGB \leftarrow CDEF$$

$$M = 1 \cdot 1 + 4 \cdot 1 - 3 + 4 \cdot 1 - 3 = 1 + 1 + 1 = 3.$$

A számításból látható, hogy mindkét szerkezeti képlet alapján a robotmechanika kinematikai határozottsági foka 3, tehát a lánc határozatlan. A lánc határozatlanságát a geometriai kényszerekben működtetett kinematikai előírásokkal kinematikailag határozottá tudjuk tenni.

Működtessünk a 4.29. ábra jelképi jelölésének A, H és E kényszereiben  $\varphi_A(t)$ ,  $s_H(t)$  és  $s_E(t)$  időfüggvényeket, amelyek szögelfordulást és elmozdulást jelentenek. A továbbiakban az ilyen kényszereket úgy jelöljük,

hogy a kényszer jele fölé egy nyilat helyezünk:  $\overset{\downarrow}{A}$ ,  $\overset{\downarrow}{H}$  és  $\overset{\downarrow}{E}$ .  
E jelöléssel a (4.35) szerkezeti képlet

$$\begin{array}{ccccccc} \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\ A \leftarrow & B & C & D & E & F \leftarrow & G & H & I, \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & & & \\ \overset{\downarrow}{A} \leftarrow & I & H & G & B \leftarrow & C & D & E & F. \end{array} \quad (4.38)$$

alakú lesz.

Jelöljük az egy láncban lévő kinematikai előírások számát  $k_g$ -vel. (4.36)-ból

$$KH_g = M_g - k_g \quad (4.39)$$

összefüggéssel a kinematikai határozottság fogalmát értelmezhetjük. A kinematikai határozottság fogalma a

$$KH = \sum_{g=1}^m KH_g \quad (4.40)$$

összefüggéssel az összetett láncra is értelmezhető, értéke  $0 \leq KH_g$  illetve  $KH_g \leq 0$  lehet. A valós robotmechanizmusok esetén  $KH_g < 0$  értéke nem értelmezhető. A  $KH_g = 0$  eset azt jelenti, hogy a geometriailag szabadon hagyott kényszereket kinematikai előírásokkal lekötöttük, tehát a mechanizmus mozgása kinematikailag határozott. A  $KH_g > 0$  esetén a szabad geometriai kényszerek nincsenek lekötve, a mechanizmus kinematikailag határozatlan.

Nézzük meg az előző példára a geometriai- és a kinematikai határozottság együttes számítását:

- (4.38) első szerkezeti képlete esetén



$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \\ A \leftarrow BCDE F \leftarrow GHI \end{array}$$

$$M = 1 \cdot 1 + 5 \cdot 1 - 3 + 3 \cdot 1 - 3 = 1 + 2 + 0 = 3,$$

$$KH = (1 \cdot 1) - 1 + (5 \cdot 1 - 3) - 1 + (3 \cdot 1 - 3) - 1 = 0 + 1 - 1 = 0,$$

- (4.38) második szerkezeti képlete esetén

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \\ \bar{A} \leftarrow IHGB \leftarrow CDE F \end{array}$$

$$M = 1 \cdot 1 + 4 \cdot 1 - 3 + 4 \cdot 1 - 3 = 2 + 1 = 3,$$

$$KH = (1 \cdot 1) - 1 + (4 \cdot 1 - 3) - 1 + (4 \cdot 1 - 3) - 1 = 0 + 0 + 0 = 0.$$

A számításokból látható, hogy a robotmechanika megfelelő kinematikai előírásokkal kinematikailag határozottá tehető.

Írjuk fel (4.40) összefüggést (4.37) és (4.39) egyenletek segítségével;

$$KH = M - \sum_{g=1}^m k_g. \quad (4.41)$$

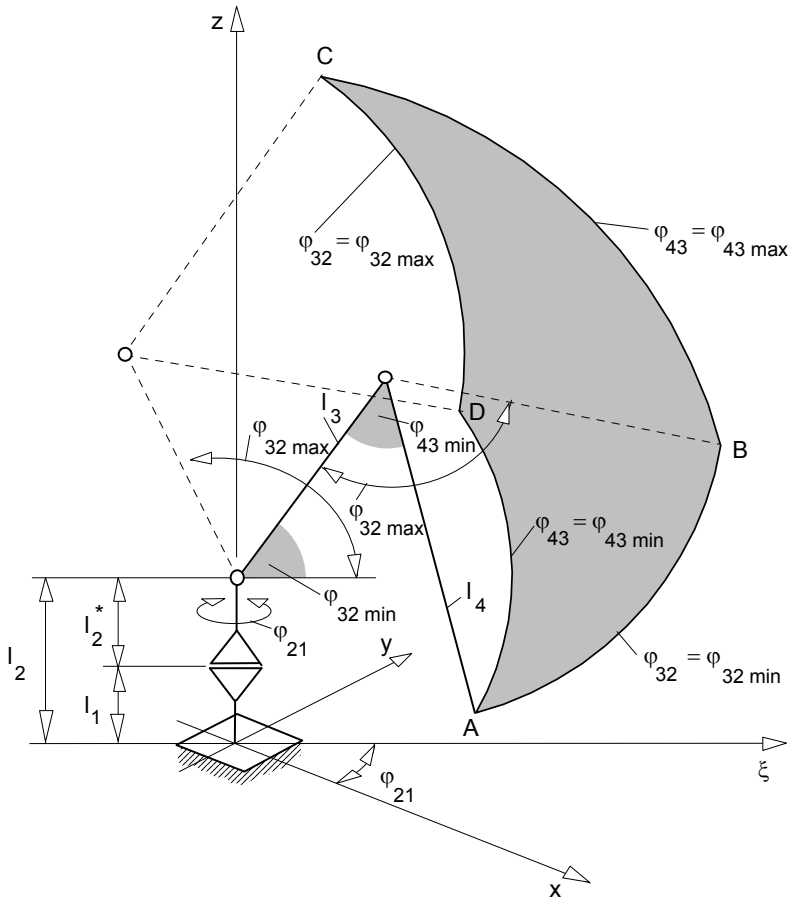
Vegyük továbbá figyelembe azt a korábbi megállapítást, hogy a mechanizmus akkor mozgásképes, ha  $M > 0$ , illetve mozgása akkor egyértelmű, ha  $KH = 0$ . E feltételek teljesítése esetén a mechanizmus szabadságfoka megegyezik vagy a geometriai határozottsággal, vagy a független kinematikai előírások számával.

## 4.2. Robotok munkatere

A robotok technológiai folyamatokban való alkalmazhatóságának meghatározó jellemzője a robot osztályra, illetve az osztályon belüli típusokra jellemző munkatér. A munkatér a robot világkoordináta rendszerében értelmezhető felületekkel határolt térrész. A határoló felületeket a robotkarok mozgástartományának határhelyezeteihez tartozó trajektóriák hordozzák.

Értelmezzük a 4.31. ábrán, a vázolt robot világkoordináta rendszerében, a  $\varphi_{32}$  és  $\varphi_{43}$  határhelyzetekhez tartozó trajektóriákat, akkor a  $\varphi_{32 \min}$  szögkoordinátaához a AB, a  $\varphi_{43 \min}$ -hoz az AD, a  $\varphi_{32 \max}$  értékhez a DC, a  $\varphi_{43 \max}$  szöghelyzethez pedig a CB ívszakaszok tartoznak. A határhelyzetek által meghatározott ADCB ívszögszög által határolt terület a mun-

katér meridián metszete. A meridián metszet ívszakaszait (4.9) felhasználásával számíthatjuk.



4.31. ábra

A meridián metszet A-B határoló görbéjének  $\varphi_{32} = \varphi_{32 \min}$ ;  $\varphi_{43} = [\varphi_{43 \min} ; \varphi_{43 \max}]$ , mozgástartományra érvényes paraméteres egyenlete:

$$\xi_{AB} = (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \cos \varphi_{32 \min} + \ell_4 \sin \varphi_{43} \sin \varphi_{32 \min}, \quad (4.42)$$

$$z_{AB} = \ell_2 + (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \sin \varphi_{32 \min} - \ell_4 \sin \varphi_{43} \cos \varphi_{32 \min}.$$

A B-C határoló görbe egyenlete a  $\varphi_{43} = \varphi_{43 \max}$ ,  $\varphi_{32} = [\varphi_{32 \min}; \varphi_{32 \max}]$ , mozgástartományra:

$$\xi_{BC} = (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43 \max}) \cos \varphi_{32} + \ell_4 \sin \varphi_{43 \max} \sin \varphi_{32}, \quad (4.43)$$

$$z_{BC} = \ell_2 + (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43 \max}) \sin \varphi_{32} - \ell_4 \sin \varphi_{43 \max} \cos \varphi_{32}.$$

A C-D görbeszakaszt leíró összefüggés  $\varphi_{32} = \varphi_{32 \max}$ ,  $\varphi_{43} = [\varphi_{43 \max}; \varphi_{43 \min}]$ , szögelfordulás tartomány esetén:

$$\xi_{CD} = (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \cos \varphi_{32 \max} + \ell_4 \sin \varphi_{43} \sin \varphi_{32 \max}, \quad (4.44)$$

$$z_{CD} = \ell_2 + (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43}) \sin \varphi_{32 \max} - \ell_4 \sin \varphi_{43} \cos \varphi_{32 \max}.$$

A D-A szakasz pedig a  $\varphi_{43} = \varphi_{43 \min}$ ;  $\varphi_{32} = [\varphi_{32 \max}; \varphi_{32 \min}]$  mozgástartományban

$$\xi_{DA} = (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43 \min}) \cos \varphi_{32} + \ell_4 \sin \varphi_{43 \min} \sin \varphi_{32}, \quad (4.45)$$

$$z_{DA} = \ell_2 + (\ell_3 - \ell_4 \cos \varphi_{43 \min}) \sin \varphi_{32} - \ell_4 \sin \varphi_{43 \min} \cos \varphi_{32}.$$

egyenletek alkalmazásával számítható.

A munkateret leíró összefüggések más robotosztályok esetén - a kar-mozgások határhelyezeteit alapul véve - ugyanezen elv alapján előállíthatók.

Példaként határozzuk meg egy A típusú csuklókaros robot meridián metszetének csúcspontjait a  $z-\xi$  koordinátarendszerben. Határozzuk meg továbbá a munkatér legnagyobb összefüggő munkafelületét.

Adatok:

$$\begin{aligned}\ell_1 &= 300[\text{mm}], \\ \ell_2 &= 250[\text{mm}], \\ \ell_3 &= 800[\text{mm}], \\ \ell_4 &= 1100[\text{mm}], \\ \varphi_{21} &= \pm 50[^\circ], \\ \varphi_{32 \min} &= 50[^\circ], \\ \varphi_{32 \max} &= 115[^\circ], \\ \varphi_{43 \min} &= 55[^\circ], \\ \varphi_{43 \max} &= 120[^\circ]\end{aligned}$$

A munkatér meridián metszetét leíró határoló görbék a (4.42)-(4.45) összefüggések és a 4.31. ábra alapján számíthatók. A meridián görbe csúcspontjait jellemző határhelyzetek;

a) Az A-B ív mentén a szögkoordináta értékek:  $\varphi_{32} = \varphi_{32 \min}$ ;  $\varphi_{43} [\varphi_{43 \min}; \varphi_{43 \max}]$ , amelyekből az A csúcspontot  $\varphi_{32} = \varphi_{32 \min}$  és  $\varphi_{43} = \varphi_{43 \min}$ , a B csúcspontot pedig  $\varphi_{32} = \varphi_{32 \min}$  és  $\varphi_{43} = \varphi_{43 \max}$  értékek jellemzik.

Behelyettesítve az adatokat a (4.9)-be a csúcspontok koordinátái:

$$\begin{aligned}\xi_A &= (800 - 1100 \cdot 0,5735) \cdot 0,642 + 1100 \cdot 0,8191 \cdot 0,766 = \\ &= 169,15 \cdot 0,642 + 690 = 798[\text{mm}],\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}z_A &= 300 + 250 + (800 - 1100 \cos 55^\circ) \sin 50^\circ - 1100 \sin 55^\circ \cos 50^\circ = \\ &= 550 + (800 - 1100 \cdot 0,5735) \cdot 0,766 - 1100 \cdot 0,8791 \cdot 0,642 = \\ &= 679,56 - 578,44 = 101,11[\text{mm}],\end{aligned}$$

$$\xi_B = (800 + 1100 \cdot 0,5)0,642 + 1100 \cdot 0,866 \cdot 0,766 =$$

$$= 866,7 + 729,69 = 1596,39[\text{mm}],$$

$$z_B = 300 + 250 + (800 - 1100 \cdot \cos 120^\circ) \sin 50^\circ - 1100 \sin 120^\circ \cos 50^\circ =$$

$$= 550 + (800 + 1100 \cdot 0,5)0,766 - 1100 \cdot 0,866 \cdot 0,642 =$$

$$= 550 + 1034,1 - 611,56 = 972,54[\text{mm}].$$

b) A B-C ív mentén  $\varphi_{43} = \varphi_{43 \max}$ ;  $\varphi_{32} = [\varphi_{32 \min}; \varphi_{32 \max}]$ . A C csúcspontot meghatározó  $\varphi_{43 \max}$  és  $\varphi_{32 \max}$  szögkoordináta értékeket behelyettesítve (4.9)-be

$$\xi_C = -(800 + 1100 \cdot 0,5) \cdot 0,422 + 1100 \cdot 0,866 \cdot 0,906 =$$

$$= -569,7 + 863,05 = 293,35[\text{mm}],$$

$$z_C = 300 + 250 + (800 - 1100 \cdot \cos 120^\circ) \sin 115^\circ - 1100 \sin 120^\circ \cos 115^\circ =$$

$$= 550 + (800 + 1100 \cdot 0,5)0,906 + 1100 \cdot 0,866 \cdot 4,422 =$$

$$= 550 + 1223,1 + 401,9 = 21750,9[\text{mm}].$$

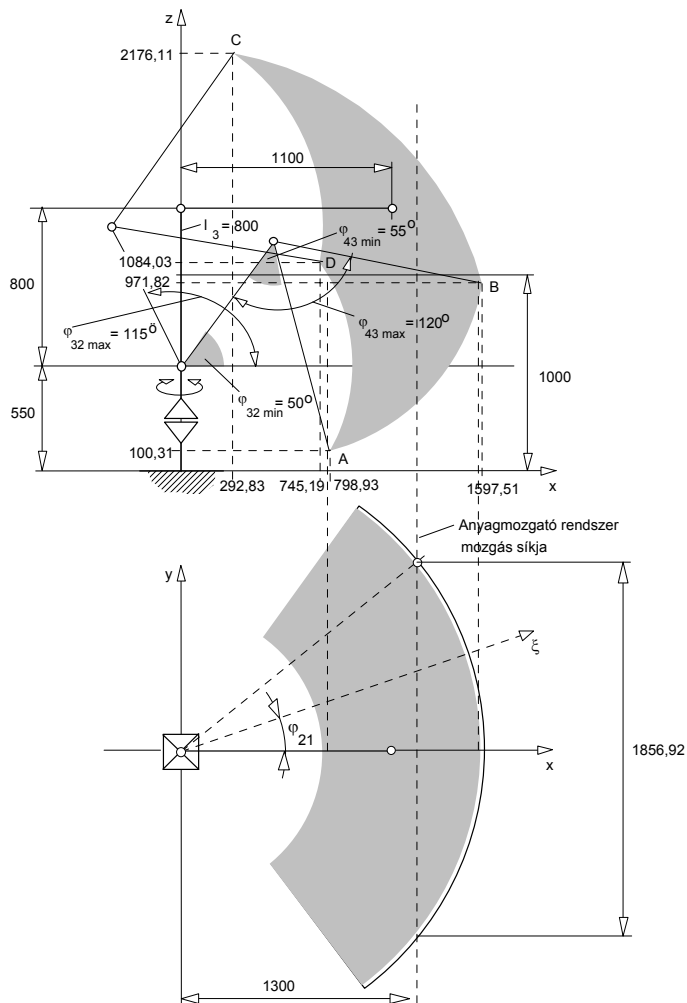
c) A C-D ív mentén  $\varphi_{32} = \varphi_{32 \max}$ ;  $\varphi_{43} = [\varphi_{43 \max}; \varphi_{43 \min}]$ , a D csúcspontot pedig a  $\varphi_{43 \min}$  és  $\varphi_{32 \max}$  szögkoordináták jellemzik, amelyeket (4.9)-be helyettesítve

$$\xi_D = -(800 - 1100 \cdot 0,5735) \cdot 4,422 + 1100 \cdot 0,819 \cdot 0,906 =$$

$$= -71,38 + 816,21 = 744,83[\text{mm}],$$

$$\begin{aligned}
 z_D &= 300 + 250 + \left(800 - 1100 \cos 55^\circ\right) \sin 115^\circ - 1100 \sin 55^\circ \cos 115^\circ = \\
 &= 550 + (800 - 1100 \cdot 0,5735) \cdot 0,906 + 1100 \cdot 0,819 \cdot 0,422 = \\
 &= 550 + 769,15 \cdot 0,906 + 380,17 = 1083,41 [\text{mm}].
 \end{aligned}$$

A fenti számadatokat a 4.32. ábra meridián metszetén is feltüntették.



4.32. ábra

A legnagyobb összefüggő munkafelület az A-D ív érintésével, valamint A-B és a B-C ív metszésével adódik. az A-B ív  $z$  tengely körüli forgatásával adódó felület egyenlete

$$x_{AB} = \xi_{AB} \cos \varphi_{21},$$

$$y_{AB} = \xi_{AB} \sin \varphi_{21},$$

$$z_{AB} = l_2 + (l_3 - l_4 \cos \varphi_{43}) \sin \varphi_{32 \min} + l_4 \sin \varphi_{43} \cos \varphi_{32 \min}.$$

vagy numerikus adatokkal

$$\xi_{AB} = (800 - 1100 \cos \varphi_{43}) 0,642 + 1100 \cdot 0,766 \sin \varphi_{43} =$$

$$= 513,6 - 706,2 \cos \varphi_{43} + 842,6 \sin \varphi_{43}.$$

$$z_{AB} = 550 + (800 - 1100 \cos \varphi_{43}) 0,766 - 1100 \cdot 0,642 \sin \varphi_{43} =$$

$$= 550 + 612,8 - 842,6 \cos \varphi_{43} - 706,2 \sin \varphi_{43} =$$

$$= 1162,8 - 842,6 \cos \varphi_{43} - 706,2 \sin \varphi_{43}.$$

Az  $x$  értékét állandónak felvéve

$$x = \text{const} = b,$$

$$\xi = \frac{b}{\cos \varphi_{21}},$$

$$y = \xi \sin \varphi_{21},$$

illetve a  $\xi_{AB}$ -re kapott numerikus egyenletből

$$706,2 \cos \varphi_{43} - 842,6 \sin \varphi_{43} = 513,6 - \xi_{AB}$$

adódik. Fejezzük ki a koszinusz függvényt a szinuszával, akkor

$$706,2 \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_{43}} = (513,6 - \xi_{AB}) + 842,6 \sin \varphi_{43},$$

egyenlethez jutunk, majd mindkét oldalt négyzetre emelve

$$702,6^2 (1 - \sin^2 \varphi_{43}) = (513,6 - \xi)^2 + 2(513,6 - \xi) \cdot 842,6 \sin \varphi_{43} + 842,6^2 \sin^2 \varphi_{43},$$

adódik, amelyből a műveletek elvégzése után

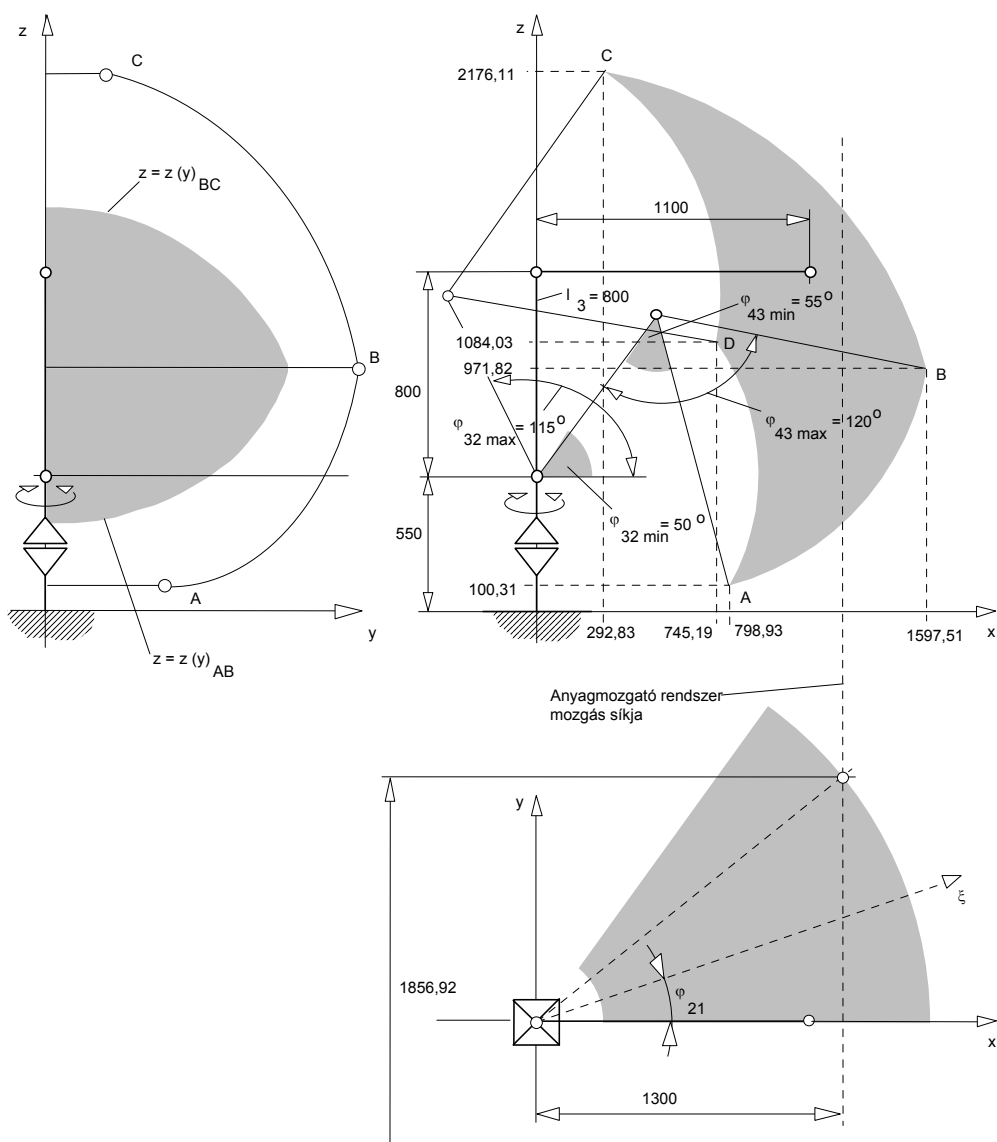
$$\begin{aligned} & (706,2^2 + 842,6^2) \sin^2 \varphi_{43} + 1685,2(513,6 - \xi) \sin \varphi_{43} - \\ & - (706,2^2 - (513,6 - \xi)^2) = 0 \end{aligned}$$

másodfokú egyenlet adódik.

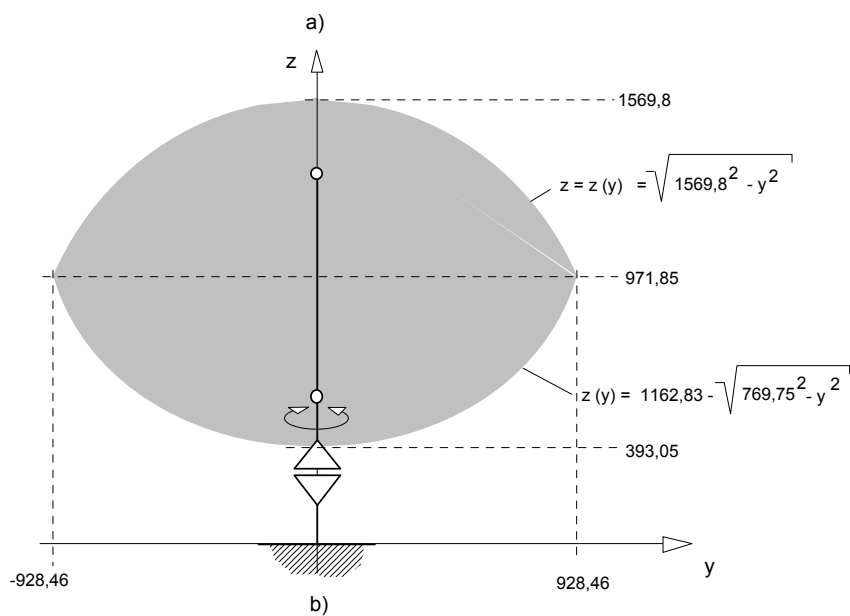
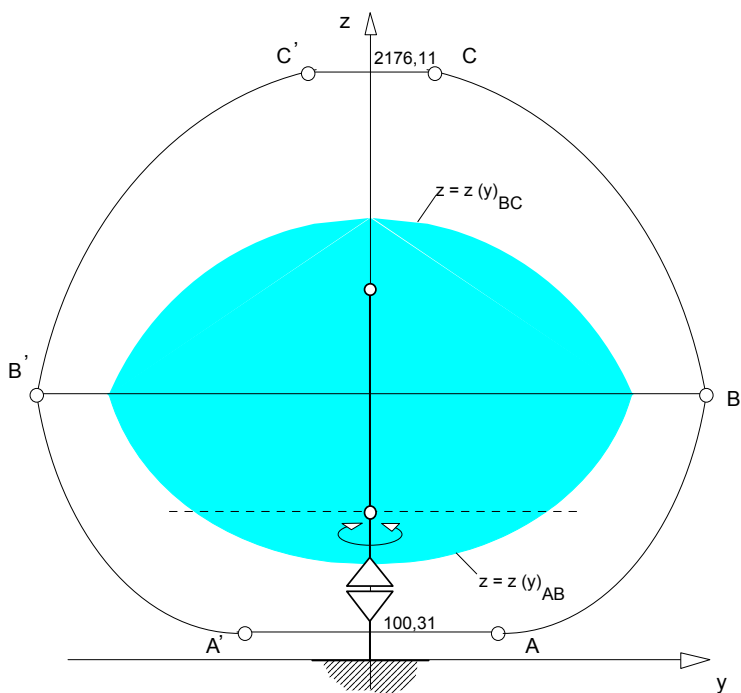
A  $\sin \varphi_{43}$  -ra másodfokú egyenletet  $\xi$ , illetve  $y$  paraméterek mellett megoldva kapjuk a  $z = z(y)$  munkafelületet határoló függvényt az AB ív által meghatározott felületen, amelyet a 4.33. ábra és kinagyítva a 4.34. ábra mutat. Hasonló elv alapján írhatjuk fel a határol görbét a BC ív mentén is.

A B típusú csuklókaros robotosztályok esetében a  $\varphi_{43 \max}$  és  $\varphi_{43 \min}$  értékei a  $\varphi_{32}$  változása esetén nem maradnak állandó értékek, ha-nem a geometriai elrendezésből adódóan - 4.1.4.a) fejezet -  $\varphi_{43 \max} = f(\varphi_{32})$ , illetve  $\varphi_{43 \min} = g(\varphi_{32})$  függvények; 4.35. ábra. A 4.36. ábra általános elrendezését alapul véve az  $ORO_1$  és az  $O_1RS$  három-szögekből korábban értelmezett (4.11) (4.12) és (4.13) összefüggések a határhelyzetre is érvényesek. A határhelyzeteket B típusú robotok esetén az  $\ell_{3 \max}^{\odot}, \ell_{3 \min}^{\odot}, \varphi_{32 \max}$  és  $\varphi_{32 \min}$  elmozdulás, illetve szögkoordináták jelölik ki. Az  $l'_{3 \max}$  érték (4.13)-ba helyettesítésével  $\varphi_{43 \max}$  -ra





4.33. ábra

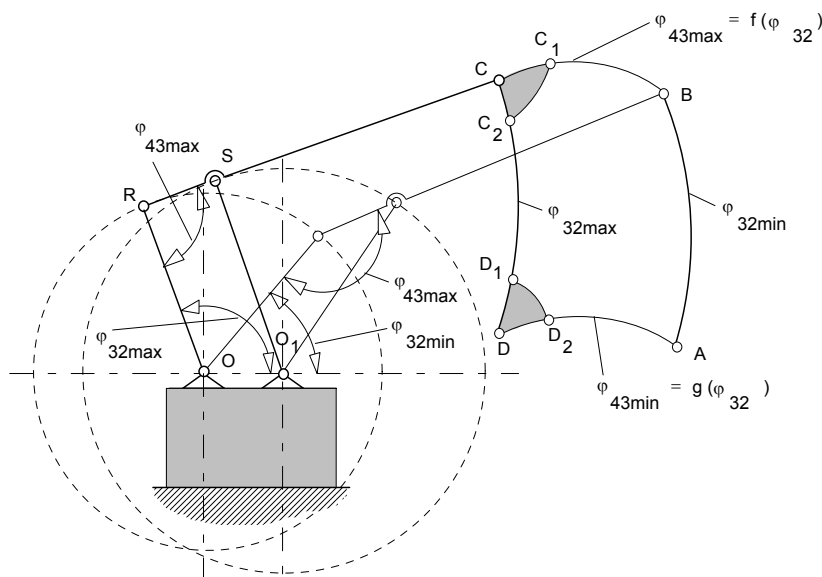


4.34. ábra

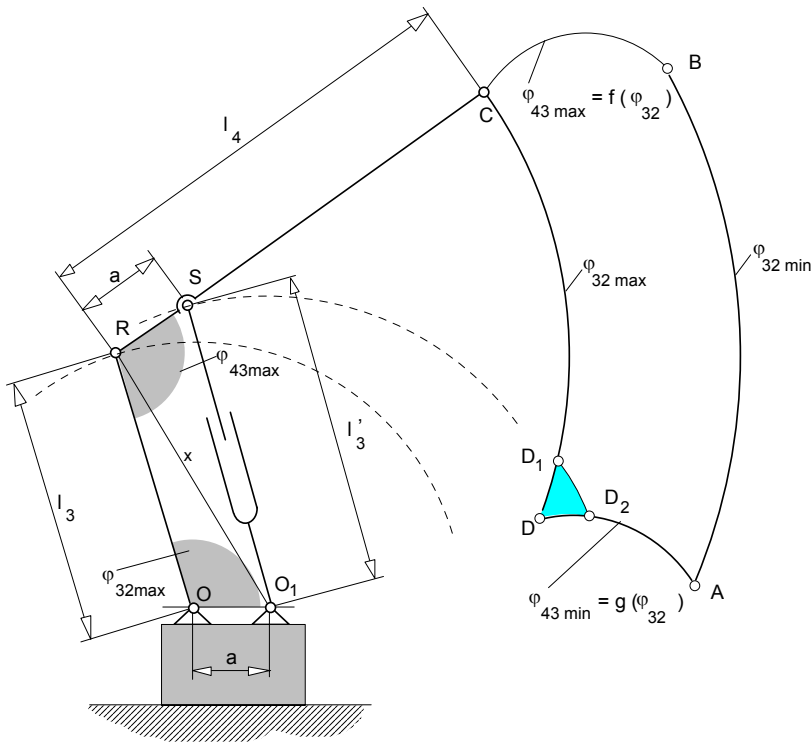
$$\begin{aligned} \varphi_{43 \max} = & \arcsin \frac{\mathbf{a} \cdot \sin \varphi_{32}}{\sqrt{\mathbf{a}^2 + \ell_3^2 - 2 \cdot \mathbf{a} \cdot \ell_3 \cos \varphi_{32}}} + \\ & + \arccos \frac{\ell_3^2 + 2\mathbf{a}^2 - \ell_{3 \max}^2 - 2\mathbf{a}\ell_3 \cos \varphi_{32}}{2\mathbf{a}\sqrt{\mathbf{a}^2 + \ell_3^2 - 2 \cdot \mathbf{a} \cdot \ell_3 \cos \varphi_{32}}} \end{aligned} \quad (4.45)$$

összefüggést kapjuk. A (4.43) összefüggés felhasználásával meghatározható a BC határ trajektória, illetve  $\varphi_{32\min}$  és  $\varphi_{32\max}$  helyettesítési értékekkel a B és a C csúcspontok helyzete. Teljesen hasonló számítás végezhető el a 4.37. ábra alapján a  $\varphi_{43\min} = g(\varphi_{32})$  szöghelyezethez tartozó meridián metszeti trajektóriára. Helyettesítsünk (4.13) -ba  $\ell'_{3\min}$  értéket, akkor  $\varphi_{43\min}$  -re

$$\begin{aligned} \varphi_{43min} = & \arcsin \frac{a \cdot \sin \varphi_{32}}{\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2 \cdot a \cdot \ell_3 \cos \varphi_{32}}} + \\ & + \arccos \frac{\ell_3^2 + 2a^2 - \ell_{3min}^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}{2a\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2 \cdot a \cdot \ell_3 \cos \varphi_{32}}} \end{aligned} \quad (4.46)$$



4.35. ábra

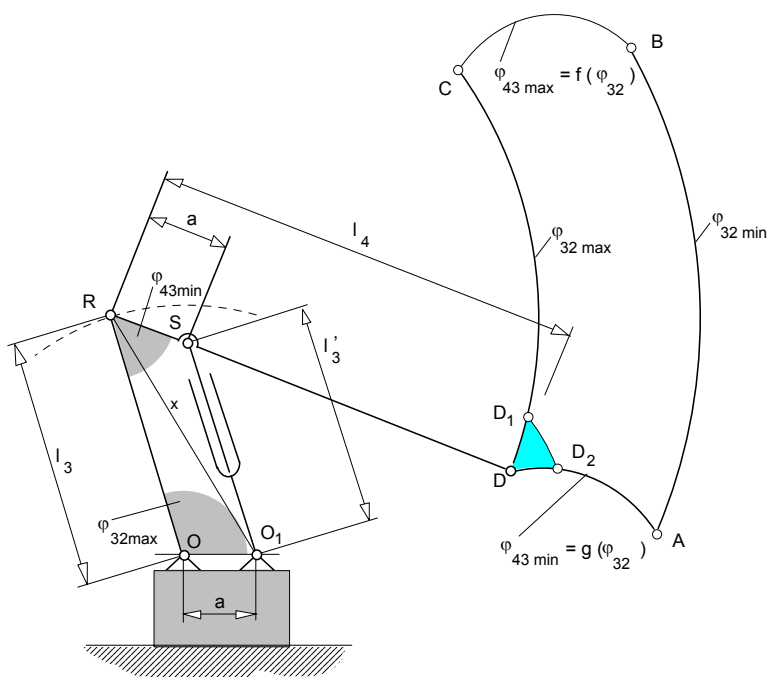


4.36. ábra

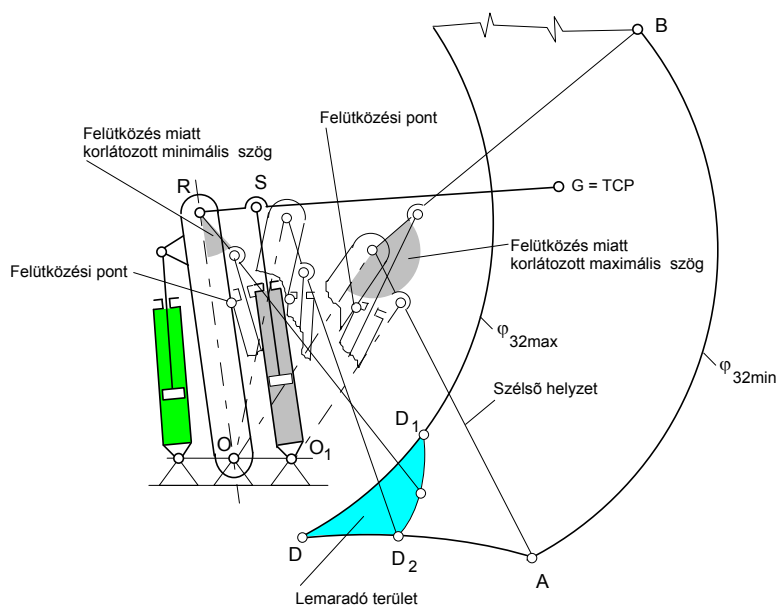
adódik.  $\varphi_{32}$  változtatásával meghatározható az AD határ trajektóriához tartozó  $\varphi_{43\min}$  értékek, amellyel (4.45) egyenletekből számítható a határ trajektória. Az A és a D csúcspontok itt is  $\varphi_{32\min}$  és  $\varphi_{32\max}$  helyettesítési értékek segítségével állíthatók elő.

Az AB és a CD csúcspontok közötti határ trajektóriák, - amelyek  $\varphi_{32\min}$  és  $\varphi_{32\max}$  szöghelyzetekkel jellemezhetők - (4.42) és (4.44) összefüggések segítségével számíthatók. A számításhoz meg kell jegyezni, hogy a  $\varphi_{43}$  értéke (4.13) egyenlet segítségével számítható, mivel a B típusú robot 4 jelű karjának szögelfordulását a hidraulikus henger  $\ell'_{3\min}; \ell'_{3\max}$  tartományban való elmozdulása biztosítja.

Az ismertetett számítás alapján meghatározható meridián metszeti trajektória konstrukciós okok miatt általában a sarokpontok környékén torzul (4.38. ábra). A torzulás egyik szembevető jellemzője, hogy a meridián metszet csonkul, egy csúcspont helyett kettő képződik. A torzulás oka ez esetben



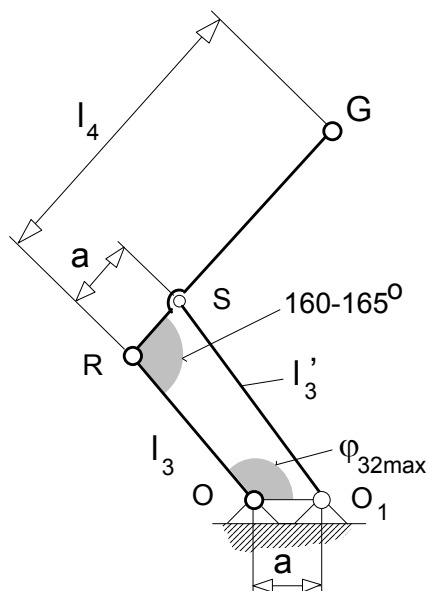
4.37. ábra



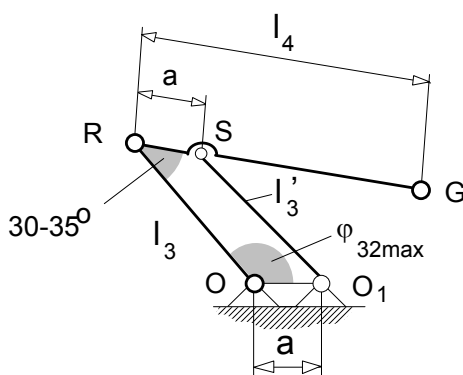
4.38. ábra

a mozgató hidraulikus henger és a mellette lévő robotkar érintkezése, tehát szerkezeti korlátozás.

A szerkezeti korlátozást geometriailag a 4.39. és a 4.40. ábrák szemléltetik, a  $\varphi_{43}$ -ra vonatkozó szöghkorlátozások konstrukciós tapasztalati adatok.



4.39. ábra



4.40. ábra

A 4.39. ábra alapján két eset különböztethető meg:

a)  $\ell'_{3\max} > \ell_3 + a$ ; e feltétel teljesítése esetén  $\varphi_{32} = \varphi_{32\max}$  és  $\varphi_{43} = 160 - 165^\circ$  adatokra (4.13) összefüggés felhasználásával meg kell határozni azt az  $\ell'_3$  értéket, ameddig a robotkart mozgató hidraulikus henger elmozdulhat. Majd innen  $\varphi_{32}$  fokozatos csökkentésével addig hajtjuk végre az  $\ell'_3$  érték számítását, amíg el nem jutunk a  $\varphi_{32\min}$  értékig. Ekkor a CB szakaszon a meridián görbe sávban csonkul, a határoló görbe ORG  $\Delta$ -ból meghatározható OG egyenes szakasszal az O pontból rajzolt körív. A sáv csonkulás oka a konstrukciós korlát.

b)  $\ell'_{3\max} < \ell_3 + a$ ; ebben az esetben  $\varphi_{43} = 160 - 165^\circ$  és  $\varphi_{32} = \varphi_{32\min}$  adatokra (4.13)-ból meg kell határozni  $\ell'_3$  értékét. Majd  $\varphi_{32}$  fokozatos növelésével addig számítjuk  $\ell'_3$  értékét, míg el nem érjük  $\ell'_{3\max}$  nagyságot. Az  $\ell'_{3\max}$  értékhez tartozó  $\varphi_{32}$  szöghelyzet és  $\varphi_{32\min}$  érték között csonkul a meridián görbe szintén egy, az előző pontban meghatározott körívvé. Az  $\ell'_{3\max}$  értékhez tartozó  $\varphi_{32\min}$  és  $\varphi_{32\max}$  tartományban  $\ell'_3 = \ell'_{3\max} =$  állandó marad és segítségével  $\varphi_{32}$  további változtatásával (4.45) alapján meghatározható  $\varphi_{43\max}$  értékei, illetve (4.43) összefüggésekkel a meridián görbe  $\xi$ ;  $z$  koordinátái.

A 4.40. ábrán vázolt helyzetben is két eset különböztethető meg és az előzőekben leírt gondolatmenet követhető végig:

a)  $\ell'_{3\min} < \ell_3 - a$ ; e feltétel fennállásakor  $\varphi_{32} = \varphi_{32\max}$  és  $\varphi_{43} = 30 - 35^\circ$  adatokra meg kell határozni azt az  $\ell'_3$  értéket, ameddig a robotkart mozgató hidraulikus henger elmozdulhat. a 4.39. ábrához tett megjegyzés a) pontja szerint itt is sávban torzul a meridián görbe, amely természetesen itt is egy körív, a sugara a 4.40. ábra OG egyenes szakasza.

b)  $\ell'_{3\min} > \ell_3 - a$ ; ebben az esetben  $\varphi_{43} = 30 - 35^\circ$  és  $\varphi_{32} = \varphi_{32\min}$  adatokra kell meghatározni  $\ell'_3$  értékét, majd  $\varphi_{32}$  fokozatos növelésével egészen addig végezzük a számítást, amíg  $\ell'_3 = \ell'_{3\min}$  értékét el nem éri. A  $\varphi_{32\min}$  és az  $\ell'_{3\min}$  értékhez tartozó  $\varphi_{32}$  értékek közötti szögtartományban csonkul a munkatér és meridián metszetének határoló görbéje ez esetben körív lesz. Az  $\ell'_{3\min}$  értékhez tartozó  $\varphi_{32}$  szögkoordináta és  $\varphi_{32\max}$  tartományban  $\ell'_{3\min}$  itt is állandó érték marad (4.46) egyenlet segítségével ebben

az esetben is számíthatók  $\varphi_{32\min}$  értékei, illetve (4.45) felhasználásával a meridián görbe  $\xi$ ;  $z$  koordinátái.

Példaként számítsuk ki az alábbi adatokkal rendelkező B típusú csuklókaros robot meridián metszetének csúcspontjait;

$$\ell_1 = 600[\text{mm}],$$

$$\ell_2^* = 225[\text{mm}],$$

$$\ell_2 = 825[\text{mm}],$$

$$\ell_3 = 1250[\text{mm}],$$

$$\ell_4 = 1600[\text{mm}],$$

$$a = 200[\text{mm}],$$

$$\ell_{3\min}' = 1100[\text{mm}],$$

$$\ell_{3\max}' = 1400[\text{mm}],$$

$$\varphi_{21} = {}^{+}_{-}65^\circ,$$

$$\varphi_{32\min} = 55^\circ,$$

$$\varphi_{32\max} = 135^\circ.$$

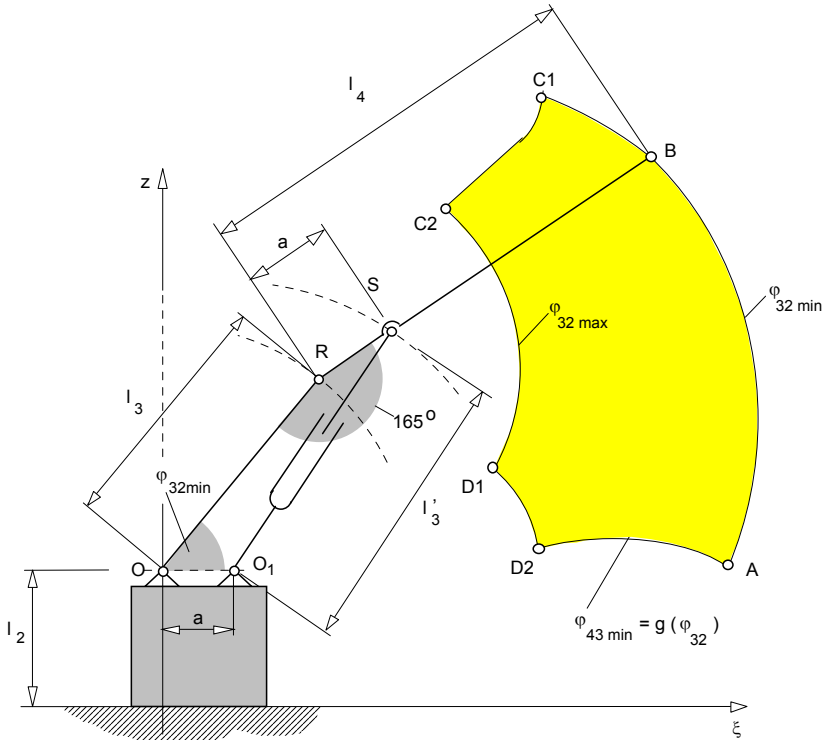
a) Az adatokból látható, hogy  $\ell_{3\max}' < \ell_3 + a$ . A meridián metszet B pontjának koordinátái a (4.42) összefüggésekből:

$$\begin{aligned}\xi_B &= (1250 - 1600 \cos 165^\circ) \cos 55^\circ + 1600 \sin 165^\circ \sin 55^\circ = \\ &= (1250 - 1600 \cdot (-0,9659)) 0,57357 + 1600 \cdot 0,25881 \cdot 0,81915 = \\ &= 1603,422 + 339,207 \cong 1942,64 \text{ mm},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}z_B &= 825 + (1250 - 1600 \cdot \cos 165^\circ) \sin 55^\circ - 1600 \cdot \sin 165^\circ \cos 55^\circ = \\ &= 825 + (1250 - 1600 \cdot (-0,9659)) \cdot 0,81915 - 1600 \cdot 0,25881 \cdot 0,57357 = \\ &= 825 + 2289,924 - 237,513 = 2877,41 \text{ mm}.\end{aligned}$$

A robotkarok állását a B pontban a 4.41. ábra mutatja.





4.41. ábra

Az ábrán az is látható, hogy a vázolt helyzetben a hidraulikus henger  $\ell_3$  kinyúlása nem érte el az  $\ell_{3\max}$  értéket.

Ezek után határozzuk meg a vázolt helyzethez (a B ponthoz, ahol  $\varphi_{43} = 165^\circ$  és  $\varphi_{32} = \varphi_{32\min} = 55^\circ$ ) az  $\ell_3$  értékét a (4.13) egyenletből nyert

$$\ell_3 = \pm \sqrt{(\ell_3^2 + 2a^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}) -}$$

$$-2a\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}. \quad (4.47)$$

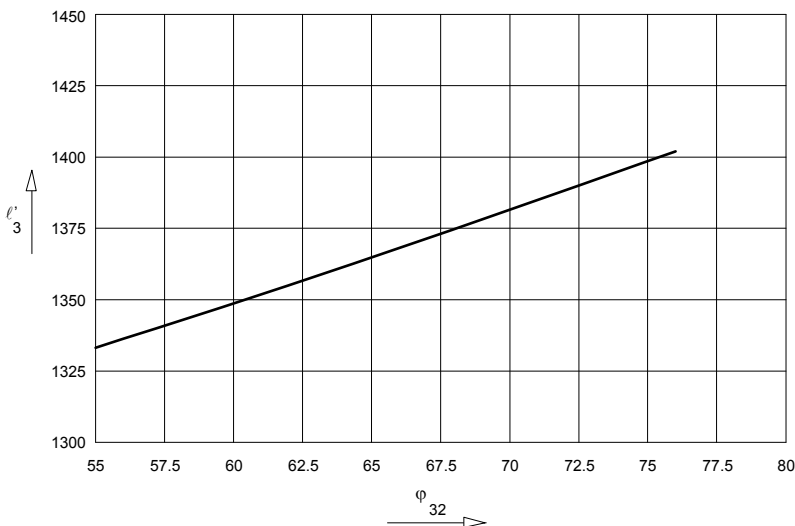
$$\cos \left[ \varphi_{43} - \arcsin \frac{a \sin \varphi_{32}}{\sqrt{a^2 + \ell_3^2 - 2a\ell_3 \cos \varphi_{32}}} \right]$$

összefüggés segítségével. A számadatokat behelyettesítve:

$$\begin{aligned} \ell'_3 &= \sqrt{(1250^2 + 2 \cdot 200^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cos 55^\circ)} - \\ &\quad - \left( 2 \cdot 200 \cdot \sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 55^\circ} \right) \cdot \\ &\quad \cdot \cos \left( 165^\circ - \arcsin \frac{200 \cdot \sin 55^\circ}{\sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cos 55^\circ}} \right) = \\ &= 1333,19 \text{ mm.} \end{aligned}$$

adódik, igazolva az előbbi állítást, hogy a hidraulikus henger kinyúlása nem éri el az  $\ell'_{3\max} = 1400 \text{ mm}$  értéket.

A  $\varphi_{32}$  értékét fokozatosan növelve (4.47)-ből meghatározhatjuk azt a  $\varphi_{32}$  értéket, ahol  $\ell'_3 = \ell'_{3\max}$  lesz. A számításokat a 4.42. ábrán foglaltuk össze. Az ábra alapján  $\ell'_{3\max} = 1400 \text{ mm}$  hengerkinyúláshoz  $\varphi_{32} \approx 75,5^\circ$  tartozik.



4.42. ábra

A C1 csúcspont koordinátáit,  $\varphi_{32} = 75,5^\circ$  és  $\varphi_{43\max} = 165^\circ$  értékekre (4.42) egyenletek felhasználásával számíthatjuk;

$$\begin{aligned}\xi_{C1} &= (1250 - 1600 \cos 165^\circ) \cos 75,5^\circ + 1600 \sin 165^\circ \cdot \sin 75,5^\circ \\ &= (1250 - 1600(-0,9659))0,25038 + 1600 \cdot 0,25881 \cdot 0,96814 = \\ &= 699,9227 + 400,929 \cong 1100,82 \text{ mm},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}z_{C1} &= 825 + (1250 - 1600 \cos 165^\circ) \sin 75,5^\circ - 1600 \sin 165^\circ \cdot \cos 75,5^\circ = \\ &= 825 + (1250 - 1600(-0,9658))0,96814 - 1600 \cdot 0,25881 \cdot 0,25038 = \\ &= 825 + 2706,37 - 103,68 \cong 3427,68 \text{ mm}.\end{aligned}$$

A meridián görbe B-C1 ívszakasza körív, amelynek sugara a 4.43. ábrán lévő OB szakasz, nagysága a  $\xi_B$  és a  $z_B$  koordinátákból számítható;

$$\begin{aligned}r_{OB} &= \sqrt{\xi_B^2 + (z_B - \ell_2)^2} = \sqrt{1942,64^2 + (2877,41 - 825)^2} = \\ &= 10^3 \sqrt{3,773850 + 4,212386} = 2825,99 \cong 2826 \text{ mm}.\end{aligned}$$



b) A meridián görbe C1-C2 ívszakaszán  $\ell_{3\max} = 1400$  mm állandó marad a  $\varphi_{32\max} = 135^\circ$  határ szöghelyzetig, így  $\varphi_{43\max}$  értéke (4.45) egyenlet alapján számítható. A C2 csúcspontra  $\varphi_{32\max} = 135^\circ$  határszög jellemző, amellyel

$$\begin{aligned}
 \varphi_{43\max} &= \arcsin \frac{200 \cdot \sin 135^\circ}{\sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 135^\circ}} + \\
 &+ \arccos \frac{1250^2 + 2 \cdot 200^2 - 1400^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 135^\circ}{2 \cdot 200 \sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 135^\circ}} = \\
 &= \arcsin \frac{200 \cdot 0,70710}{\sqrt{4 \cdot 10^4 + 1,5625 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot (-0,70710)}} + \\
 &+ \arccos \frac{1,5625 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^4 - 1,96 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot (-0,70710)}{400400 \sqrt{4 \cdot 10^4 + 1,5625 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot (-0,70710)}} = \\
 &= \arcsin \frac{141,42136}{\sqrt{1,95605 \cdot 10^6}} + \arccos \frac{0,03605 \cdot 10^6}{400 \sqrt{1,95605 \cdot 10^6}} = \\
 &= \arcsin \frac{141,42136}{1398,5886} + \arccos \frac{36050}{400 \cdot 1398,5886} = \\
 &= 5,8035 + 86,3053 = 92,108^\circ.
 \end{aligned}$$

A C2 csúcspont koordinátáira (4.42) egyenletek felhasználásával

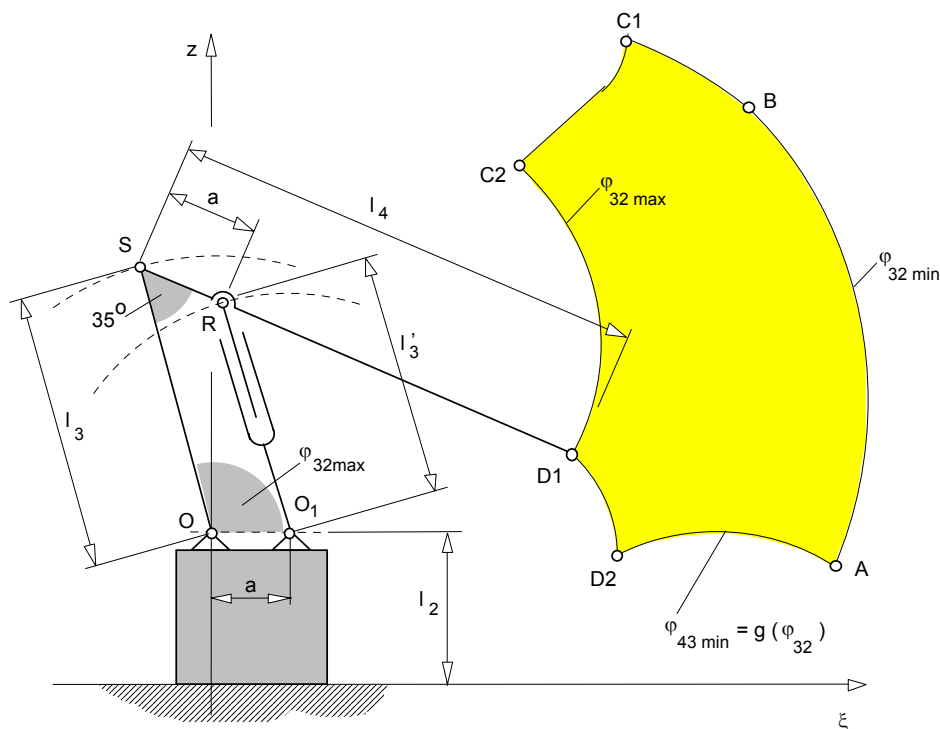
$$\begin{aligned}
\xi_{C2} &= (1250 - 1600 \cdot \cos 92,108^\circ) \cos 135^\circ + 1600 \sin 92,108^\circ \sin 135^\circ = \\
&= (1250 - 1600 \cdot (-0,03679) \cdot (-0,70710)) + 1600 \cdot 0,99932 \cdot 0,70710 = \\
&= -925,4977 + 1130,5907 = 205,097 \text{ mm}, \\
z_{C2} &= 825 + (1250 - 1600 \cos 92,108^\circ) \sin 135^\circ - 1600 \sin 92,108^\circ \cos 135^\circ = \\
&= 825 + (1250 - 1600(-0,03679)) \cdot 0,70710 - 1600 \cdot 0,99932 \cdot (-0,70710) = \\
&= 825 + 925,497 + 1130,59 = 2881,11 \text{ mm}.
\end{aligned}$$

adódik. A C1-C2 ívszakasz pontjainak számítási eredményeit a 4.2. táblázat tartalmazza.

4.2. táblázat

$\varphi_{32} [^\circ]$	$\xi [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$	$\ell'_3 [\text{mm}]$	$\varphi_{43} \max [^\circ]$
75,5	1100,82	3427,68	1400,00	165
80	1148,56	3356,90	1400,00	154,4
85	1127,02	3304,55	1400,00	145,48
90	1072,24	3262,56	1400,00	137,92
95	998,62	3224,93	1400,00	131,19
100	913,20	3188,49	1400,00	125,06
105	820,09	3151,4	1400,00	119,38
110	721,96	3112,57	1400,00	114,07
115	620,66	3071,41	1400,00	109,10
120	517,5	3027,65	1400,00	104,43
125	413,46	2981,25	1400,00	100,05
130	309,18	2932,33	1400,00	95,94
135	205,09	2881,11	1400,00	92,1

c) A meridián görbe C2-D1 ívszakaszának jellemzője, hogy  $\varphi_{32\max} = 135^\circ$  állandó érték marad, miközben  $\varphi_{43}$ , illetve  $\ell'_3$  értékei csökkennek. A D1 csúcspontban  $\varphi_{43\min} = 35^\circ$  értéket vesz fel. A robot D1 csúcspontbeli helyzetét a 4.44. ábra mutatja.



4.44. ábra

A D1 csúcspontra jellemző koordináták a (4.42) egyenletekből;

$$\begin{aligned}
 \xi_{D1} &= (1250 - 1600 \cdot \cos 135^\circ) \cos 135^\circ + 1600 \sin 35^\circ \sin 135^\circ = \\
 &= (1250 - 1600 \cdot 0,81915) \cdot (-0,70710) + 1600 \cdot 0,57357 \cdot 0,7071 = \\
 &= 42,8785 + 648,9141 = 691,80 \text{ mm},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{D1} &= 825 + (1250 - 1600 \cdot \cos 35^\circ) \sin 135^\circ - 1600 \sin 35^\circ \cos 135^\circ = \\
 &= 825 + (1250 - 1600 \cdot 0,81915) \cdot 0,7071 - 1600 \cdot 0,57357 \cdot (-0,7071) = \\
 &= 825 - 42,8785 + 648,9141 = 1431,05 \text{ mm}.
 \end{aligned}$$

A C2-D1 meridián görbe ívszakasz pontjainak számítási eredményeit a 4.3. táblázatban tüntettük fel.

4.3. táblázat

$\varphi_{43} [^\circ]$	$\xi [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$	$\ell'_3 [\text{mm}]$	$\varphi_{32} [^\circ]$
92,108	205,09	2881,11	1400,00	135
90	247,48	2840,25	1392,65	135
85	341,78	2737,34	1375,21	135
80	426,76	2626,61	1357,83	135
75	501,75	2508,88	1340,66	135
70	566,20	2385,07	1323,83	135
65	619,62	2256,12	1307,5	135
60	661,59	2122,99	1291,81	135
55	691,80	1986,72	1276,90	135
50	710,02	1848,33	1262,92	135
45	716,11	1708,88	1250,00	135
40	710,02	1569,43	1238,28	135
35	691,80	1431,05	1227,88	135

A (4.47) összefüggés segítségével határozzuk meg a D1 csúcs-ponthoz  $(\varphi_{43} = 35^\circ; \varphi_{32} = 135^\circ)$  az  $\ell'_3$  értékét

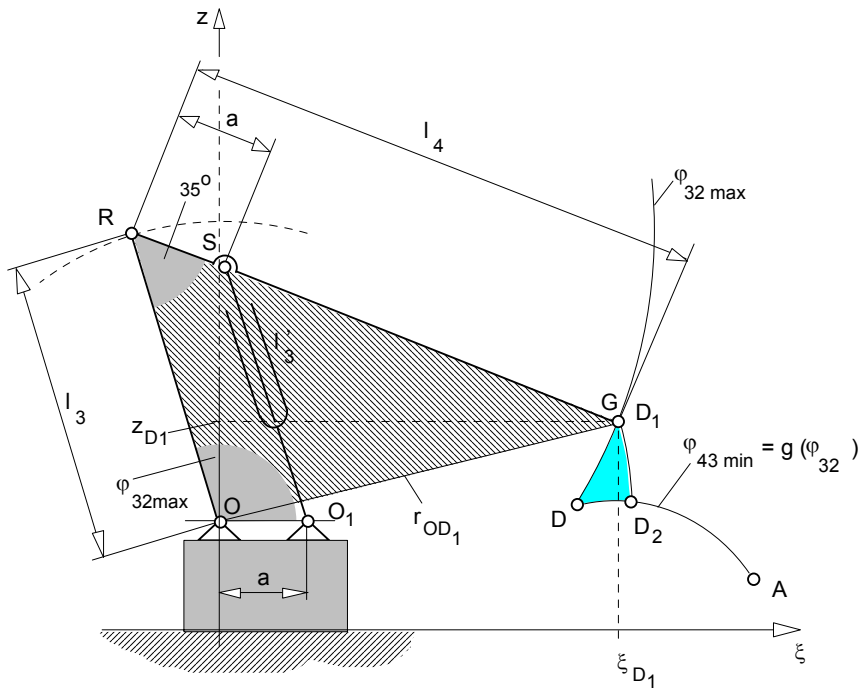


$$\begin{aligned}
\ell'_3 &= \sqrt{(1250^2 + 2 \cdot 200^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 135^\circ)} - \\
&\quad - \left( 2 \cdot 200 \cdot \sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 135^\circ} \right) \\
&\quad \cdot \cos \left( 35^\circ - \arcsin \frac{200 \cdot \sin 135^\circ}{\sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 135^\circ}} \right) = \\
&= \sqrt{(1,5625 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5 \cdot (-0,7071))} - \\
&\quad - (400 \cdot \sqrt{4 \cdot 10^4 + 1,5625 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot (-0,7071)}) \cdot \\
&\quad \cdot \cos \left( 35^\circ - \arcsin \frac{200 \cdot 0,7071}{\sqrt{4 \cdot 10^4 + 1,5625 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot (-0,7071)}} \right) = \\
&= 1227,88 \text{ mm}.
\end{aligned}$$

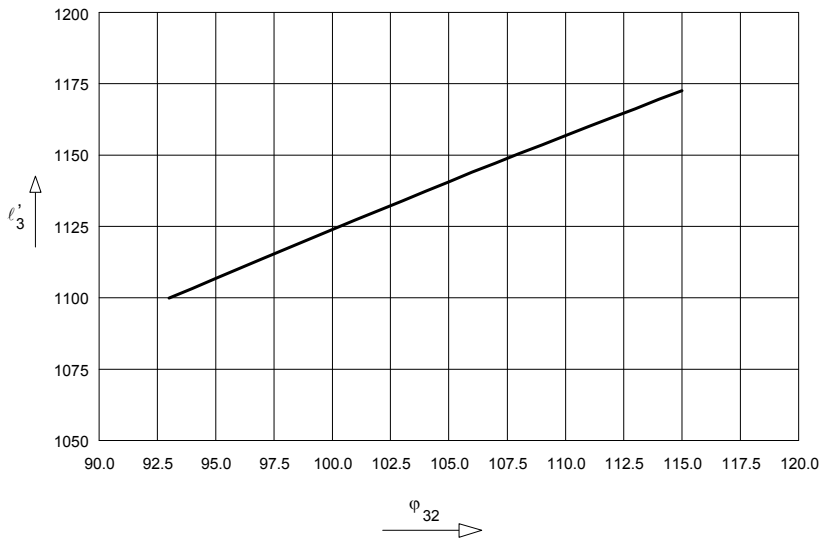
A kapott eredményből megállapíthatjuk, hogy a D1 csúcspontban a hidraulikus henger összenyomódása nem éri el az  $\ell'_3 = 1100 \text{ mm}$  értéket.

d) A meridián görbe D1-D2 ívszakaszán a  $\varphi_{32}$  szögkoordináta csökken, miközben a szerkezeti korlátozás miatt  $\varphi_{43} = \varphi_{43\min} = 35^\circ$  állandó értéken marad. A 4.45. ábrából látható, hogy ez az ívszakasz is körív lesz.

A  $\varphi_{32}$  szögkoordináta csökkenése közben a hidraulikus henger  $l'_3$  hossza (összenyomódása) is csökken. A D2 csúcspontban ez az összenyomódás eléri az  $\ell'_{3\min} = 1100 \text{ mm}$  értéket. A 4.46. ábra alapján ez  $\varphi_{32} = 93^\circ$ -nál következik be.



4.45. ábra



4.46. ábra

A D2 csúcspont koordinátái  $\varphi_{32} = 93^\circ$  és  $\varphi_{43\min} = 35^\circ$  szögkoordinátákra;

$$\begin{aligned}\xi_{D2} &= (1250 - 1600 \cos 35^\circ) \cos 93^\circ + 1600 \sin 35^\circ \sin 93^\circ = \\ &= (1250 - 1600 \cdot 0,81915) \cdot (-0,05233) + 1600 \cdot 0,57357 \cdot 0,99862 = \\ &= 919,61 \text{ mm},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}z_{D2} &= 825 + (1250 - 1600 \cos 35^\circ) \sin 93^\circ - 1600 \sin 35^\circ \cos 93^\circ = \\ &= 825 + (1250 - 1600 \cdot 0,81915) \cdot 0,99862 - 1600 \cdot 0,57357 \cdot (-0,05233) = \\ &= 812,47 \text{ mm}.\end{aligned}$$

A D1-D2 ívszakasz pontjainak koordinátáit és a robot jellemző értékeit, jellemzőit a 4.4. táblázat mutatja.

4.4. táblázat

$\varphi_{32} [^\circ]$	$\xi [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$	$\ell_3 [\text{mm}]$	$\varphi_{43} [^\circ]$
135	691,80	1431,05	1227,88	35
130	741,99	1368,45	1215,34	35
125	786,53	1301,71	1201,89	35
120	825,09	1231,34	1187,61	35
115	867,36	1157,88	1172,58	35
110	883,11	1081,89	1156,89	35
105	902,14	1003,95	1140,64	35
100	914,31	924,63	1123,91	35
95	919,51	844,57	1106,83	35
93	919,61	812,47	1100	35

e) A  $\varphi_{32} = 93^\circ$  szögkoordinátát tovább csökkentve  $\ell_{3\min} = 1100\text{mm} = \text{const}$  marad, így  $\varphi_{43\min}$  értéke (4.46) egyenlet segítségével számítható. E feltételek a meridián görbe D2-A ívszakaszára jellemzőek. A meridián görbe A csúcspontjának jellemző szögkoordinátája a fentiekén túl még  $\varphi_{32\min} = 55^\circ$  is, amellyel

$$\begin{aligned}
 \varphi_{43\min} &= \arcsin \frac{200 \cdot \sin 55^\circ}{\sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 55^\circ}} + \\
 &+ \arccos \frac{1250^2 + 2 \cdot 200^2 - 1100^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 55^\circ}{2 \cdot 200 \sqrt{200^2 + 1250^2 - 2 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot \cos 55^\circ}} = \\
 &= \arcsin \frac{200 \cdot 0,81915}{\sqrt{4 \cdot 10^4 + 1,5625 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot 0,57357}} + \\
 &+ \arccos \frac{1,5625 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^4 - 1,21 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot 0,57357}{400 \sqrt{4 \cdot 10^4 + 1,5625 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^5 \cdot 0,57357}} = \\
 &= \arcsin \frac{163,83}{\sqrt{1,31572 \cdot 10^6}} + \arccos \frac{145,72 \cdot 10^3}{400 \sqrt{1,31572 \cdot 10^6}} = \\
 &= \arcsin \frac{163,83}{1147,04} + \arccos \frac{145,72 \cdot 10^3}{400 \cdot 1,14704 \cdot 10^3} = \\
 &= 8,2115^\circ + 71,4821^\circ = 79,69^\circ.
 \end{aligned}$$

Az A csúcspont koordinátáit (4.42) egyenletek alapján számítva:

$$\begin{aligned}
 \xi_A &= (1250 - 1600 \cos 79,69^\circ) \cos 55^\circ + 1600 \sin 79,69^\circ \sin 55^\circ = \\
 &= (1250 - 1600 \cdot 0,17897) \cdot 0,57357 + 1600 \cdot 0,98385 \cdot 0,81915 = \\
 &= 552,8195 + 1289,4732 \cong 1842,3 \text{ mm},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_A &= 825 + (1250 - 1600 \cos 79,69^\circ) \sin 55^\circ - 1600 \sin 79,69^\circ \cos 55^\circ = \\
 &= 825 + (1250 - 1600 \cdot 0,17897) 0,81915 - 1600 \cdot 0,98385 \cdot 0,57357 = \\
 &= 825 + 789,4522 - 902,8909 = 711,56 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

értékeket kapjuk. A D2-A meridián görbe ívszakasz koordinátáit és a robot geometriai jellemzőit a 4.5. táblázat foglalja össze.

4.5. táblázat

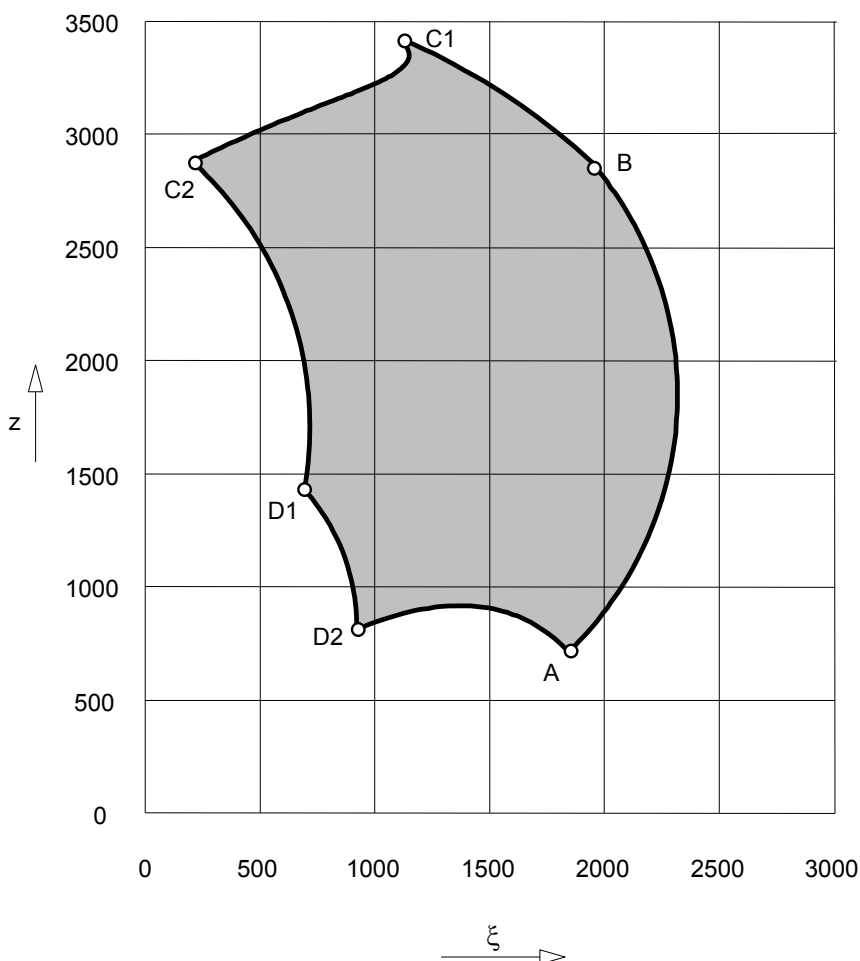
$\varphi_{32} [^\circ]$	$\xi [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$	$\ell_3 [\text{mm}]$	$\varphi_{43} [^\circ]$
93	919,61	812,47	1100	35
90	1037,54	857,00	1100	40,42
85	1200,90	900,78	1100	48,03
80	1340,95	917,20	1100	54,62
75	1465,26	911,49	1100	60,52
70	1576,88	886,51	1100	65,91
65	1676,92	844,06	1100	70,88
60	1765,55	785,41	1100	75,46
55	1842,30	711,56	1100	79,69

f) A meridián görbe A-B ívszakaszának jellemzője, hogy  $\varphi_{32} = \varphi_{32\min} = 55^\circ = \text{állandó}$ . Az ívszakasz pontjainak koordinátái a (4.42) egyenletek szerint számíthatók, a számítási eredményeket a 4.6. táblázat tartalmazza.

4.6. táblázat

$\varphi_{43} [^\circ]$	$\xi [\text{mm}]$	$z [\text{mm}]$	$\ell_3 [\text{mm}]$	$\varphi_{32 \text{ min}} [^\circ]$
79,69	1843,30	711,56	1100	55
80	1848,34	717,56	1101,05	55
85	1942,64	820,48	1118,41	55
90	2027,61	931,21	1135,86	55
95	2102,61	1048,94	1153,26	55
100	2167,06	1172,75	1170,48	55
105	2220,48	1301,71	1187,41	55
110	2262,45	1434,83	1203,93	55
115	2292,66	1571,10	1219,93	55
120	2310,88	1709,49	1235,32	55
125	2316,97	1848,94	1250,00	55
130	2310,88	1988,39	1263,89	55
135	2292,66	2126,78	1276,9	55
140	2262,45	2263,05	1288,98	55
145	2220,48	2396,17	1300,04	55
150	2167,06	2525,13	1310,05	55
155	2102,61	2648,94	1318,9	55
160	2027,61	2766,66	1326,66	55
165	1942,64	2877,4	1333,19	55

A 4.1. - 4.6. táblázatok adatai alapján meghatározott munkatér meridián görbét a 4.47. ábra mutatja.



4.47. ábra

### 4.3. Robotkarok tömegkiegyenlítő rendszerei

A 4.1.6. fejezetből ismert, hogy a robotokat, mint mechanizmusokat a kinematikai kényszerekben működtetett kinematikai előírásokkal tehetjük határozottá. Ez azt jelenti, hogy a szóban forgó kinematikai kényszerhez kapcsolódó tagot (robotkart) meghatározott törvényszerűséggel mozgatjuk. A mozgatáshoz a szükséges erő vagy nyomaték nagysága a karok mozgástartományától függően olyan nagy intervallumban változhat, hogy azt sok esetben egy hajtómotorral nem lehet biztosítani. Ezért a karok tömegeit valami-

lyen szerkezetekkel igyekeznek a mozgástartományban kiegyenlíteni. A tömegkiegyenlítési módszerek leginkább a függőleges síkú csuklókaros (RRR) robotosztálynál terjedtek el. Elvében arra irányulnak, hogy a robotkarok önsúlyából a kinematikai kényszerekre (csuklókra) ható nyomatékok ne terheljék a hajtómotorokat.

A gyakorlatban négy tömegkiegyenlítési mód terjedt el:

- a) Ellensúllyal való tömegkiegyenlítés:
  - közvetlenül a kiegyenlítendő karhoz kapcsolódó ellensúly,
  - a kiegyenlítendő karhoz egy áttételi mechanizmus segítségével kapcsolódó ellensúly.
- b) Vezérelt hidraulikus vagy pneumatikus hengerek segítségével való tömegkiegyenlítés.
- c) Vezérlés nélküli hidraulikus vagy pneumatikus hengerek segítségével való tömegkiegyenlítés.
- d) Rúgós mechanizmussal való tömegkiegyenlítés.

#### 4.3.1. Ellensúllyal való tömegkiegyenlítés

##### a) Közvetlenül a kiegyenlítendő karhoz kapcsolódó ellensúly

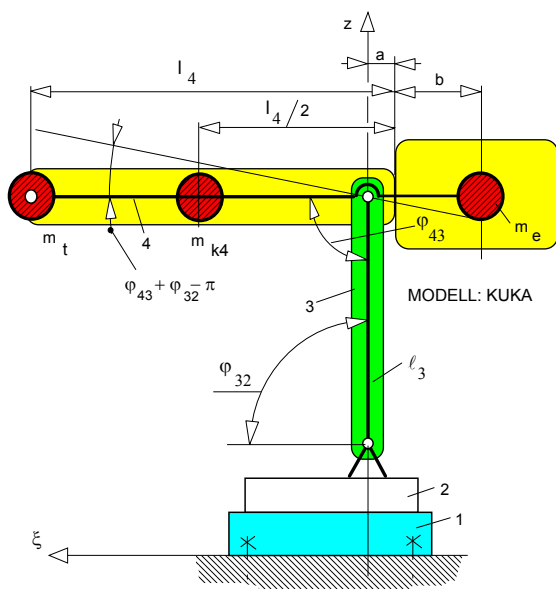
Közvetlenül a kiegyenlítendő karhoz kapcsolódó ellensúllyal történő tömegkiegyenlítés újabban a KUKA típusú robotokra jellemző. A kiegyenlítő rendszer vázlatát a 4.46.- és 4.47. ábrák mutatják. A kiegyenlítettlen 4 kar és az  $m_t$  terhelő tömeg nyomatéka a 4 kar forgó tengelyére:

$$M_k = (m_t + m_{k4} \left( \frac{1}{2} - \frac{a}{\ell_4} \right)) \ell_4 g \cos(\varphi_{43} - \varphi_{32} - \pi). \quad (4.48)$$

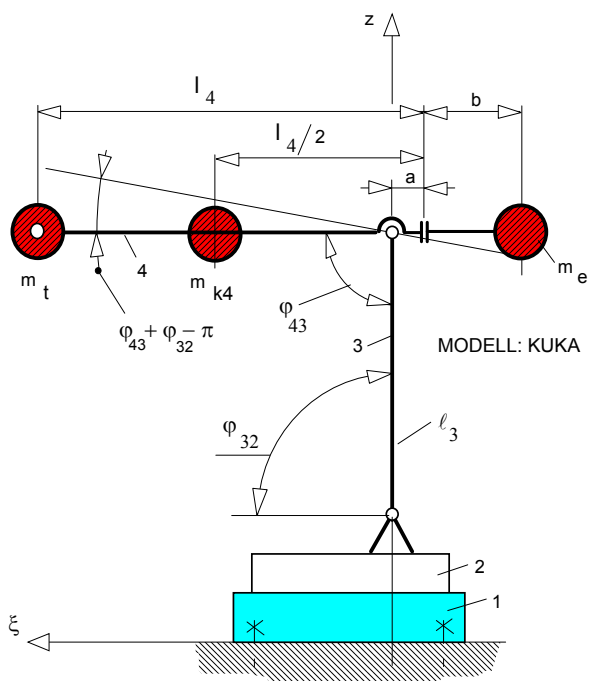
A 4 kart kiegyenlítő tömeg a kar teljes mozgástartományában:

$$m_e = \frac{\ell_4 \left[ m_t + m_{k4} \left( \frac{1}{2} - \frac{a}{\ell_4} \right) \right]}{a + b}. \quad (4.49)$$





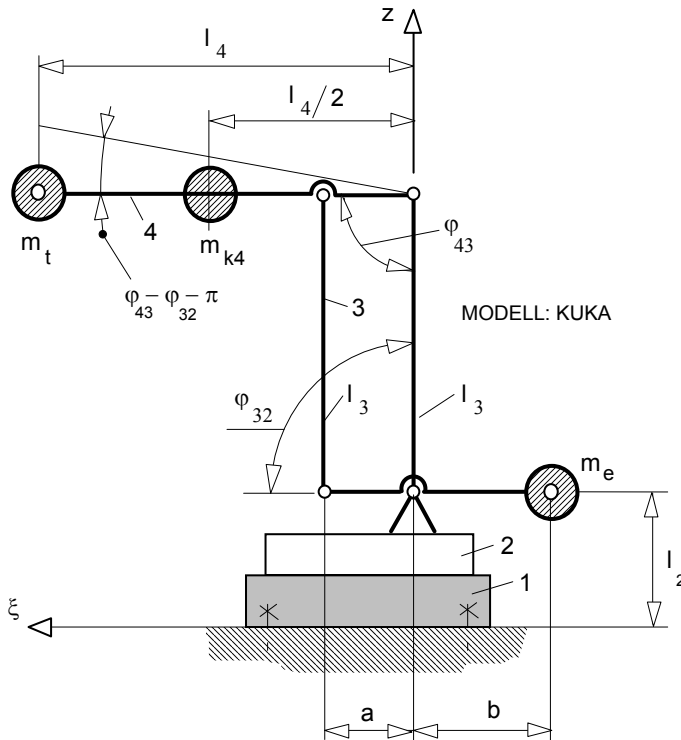
4.46. ábra



4.47. ábra

**b) A kiegyenlítő karhoz áttételi mechanizmus segítségével kapcsolódó ellensúly**

E kiegyenlítési mód a KUKA és az ASEA típusú robotok jellemzője. A KUKA típusú robotok esetén a kiegyenlítő mechanizmust a 4.48. ábra mutatja.

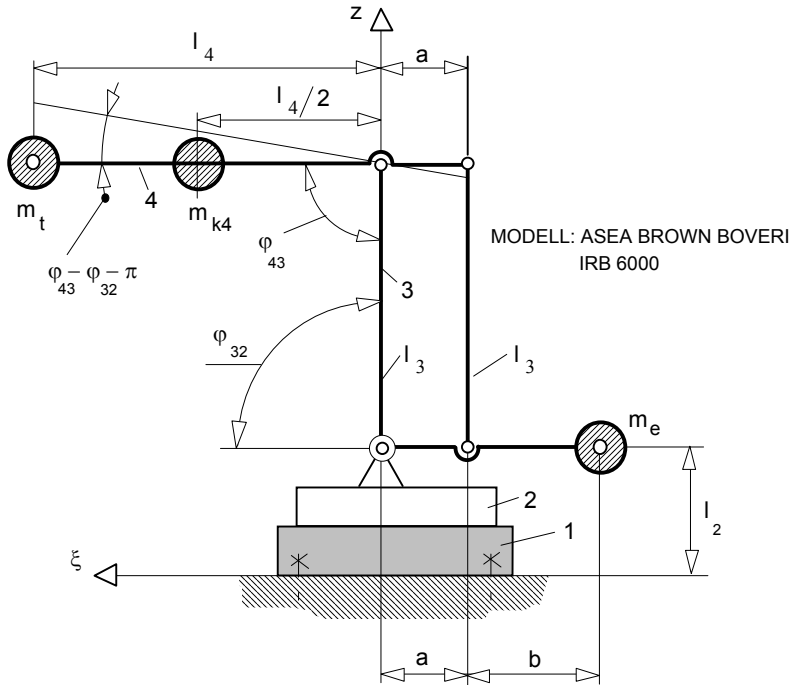


4.48. ábra

Mozgástartományát tekintve általában a 4 jelű kar hajtónyomaték szükséglete olyan mértékű, amely nehezen realizálható. A 3 jelű kar tömeg kiegyenlítésétől általában a karnak a függőleges tengelyhez viszonyított szimmetrikus elmozdulási lehetősége miatt tekintenek el.

Az ASEA típusú robotok kiegyenlítő mechanizmusa a 4.49. ábrán látható. A kiegyenlítetlen 4 kar önsúlyából  $m_{k4}$  és a terhelésből  $m_t$  adódó, hajtómotort terhelő, nyomatéka a 4.48. ábra alapján a

$$M_k = (m_t + \frac{m_{k4}}{2}) \ell_4 g \cos(\varphi_{43} + \varphi_{32} - \pi) \quad (4.50)$$



4.49. ábra

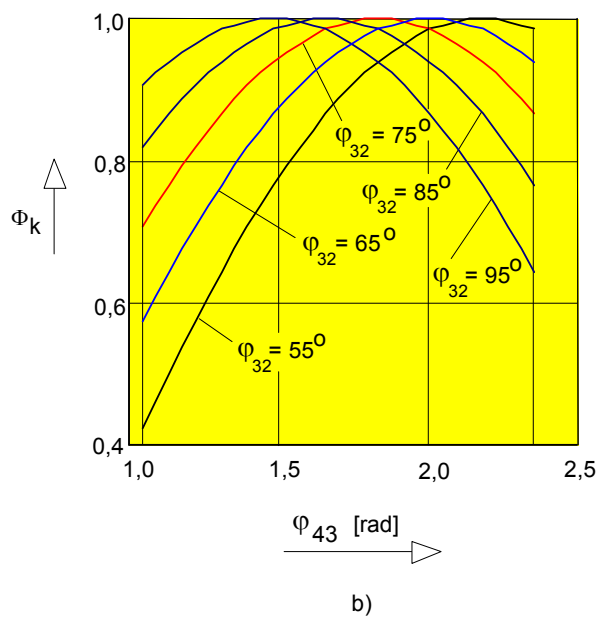
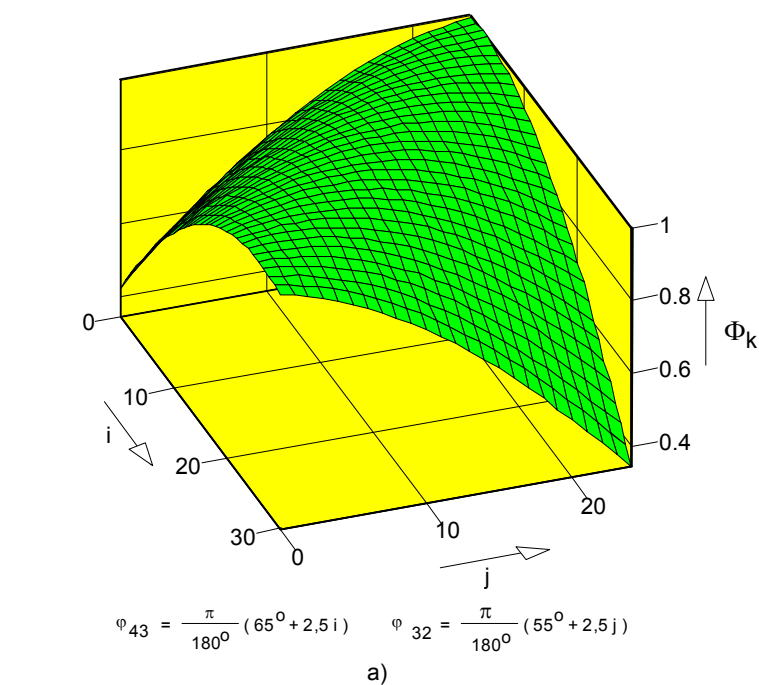
összefüggéssel, a 4.49. ábra alapján pedig a 4. kar azonos tömegeloszlását feltételezve

$$M_k = \left[ m_t + \frac{m_{k4}}{2} \left( 1 - \frac{a}{l_4} \right) \right] l_4 g \cos(\varphi_{43} + \varphi_{32} - \pi) \quad (4.51)$$

egyenlettel határozható meg. (4.50) és (4.51) egyenletek alapján a kiegyenlítettlen önsúlyból és a terhelésből adódó terhelő nyomaték egy konstans és a

$$\Phi_k = \cos(\varphi_{43} + \varphi_{32} - \pi) \quad (4.52)$$

dimenziótlan tényező szorzataként állítható elő. A  $\Phi_k$  értékeit a 4.50. ábra mutatja  $\varphi_{32}$  paraméterek függvényében. Az ábrából látható, hogy bizonyos  $\varphi_{32}$  értékek esetén a kiegyenlítettlen nyomatékok változása a  $\varphi_{43}$  mozgástartományban elérheti a 70%-ot is, amely DC motorok esetén nem kívánatos, mert a motor telítésbe megy át.



4.50. ábra

A 4.48. ábra szerinti kiegyenlítő mechanizmussal a 4 kart a mozgás teljes tartományában

$$m_e = \frac{(m_t + \frac{m_{k4}}{2})\ell_4 + m_{ki} \frac{a-b}{2}}{b} \quad (4.53)$$

tömeggel tudjuk egyenlíteni, ahol  $m_{ki}$  a kiegyenlítő súlyt tartó kar tömege. Az ASEA típusú robotoknál alkalmazott 4.47. ábra szerinti kiegyenlítő mechanizmus esetén a 4 kar

$$m_e = \frac{\left[ m_t + \frac{m_{k4}}{2} \left( 1 - \frac{a}{\ell_4} \right) \right] \ell_4 - m_{ki} \frac{a+b}{2}}{a+b} \quad (4.54)$$

tömeggel egyenlíthető ki a teljes mozgástartományban. Mindkét kiegyenlítő mechanizmus esetén 3' rúd tömege elhanyagolható.

Példaként határozzuk meg a 4.48. ábra kiegyenlítő mechanizmusa esetén a kiegyenlítő súly nagyságát az alábbi adatokra:

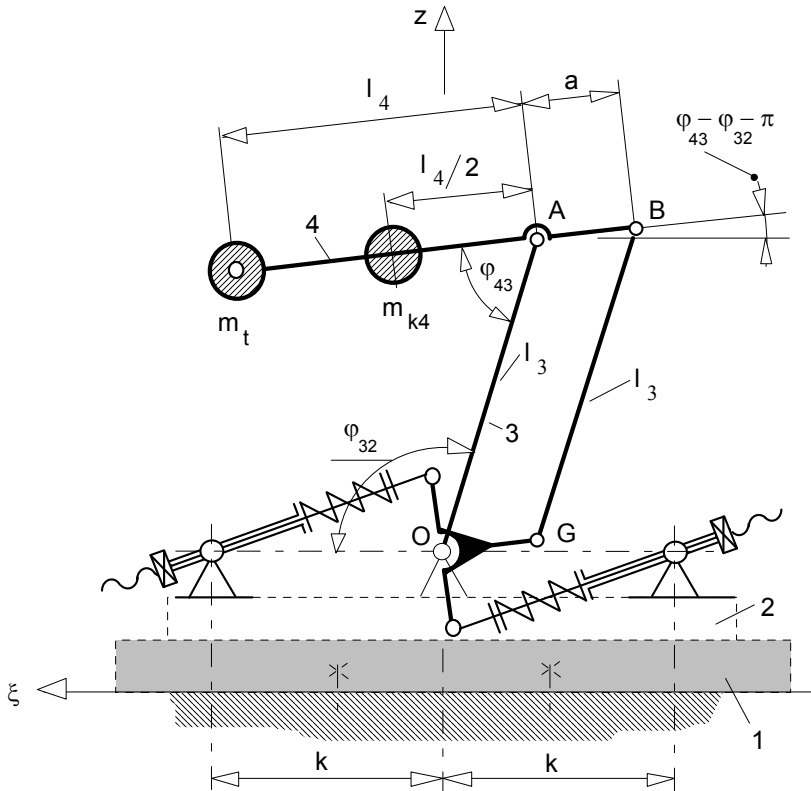
$$\begin{aligned} m_{k4} &= 7,0[\text{kg}] \\ m_{ki} &= 1,0[\text{kg}] \\ m_t &= 1,5[\text{kg}] \\ a &= 200[\text{mm}] \\ b &= 500[\text{mm}] \\ \ell_4 &= 1100[\text{mm}] \end{aligned}$$

(4.52)-be a fenti adatokat behelyettesítve

$$\begin{aligned} m_e &= \frac{(m_t + \frac{m_{k4}}{2})\ell_4 + m_{ki} \frac{a-b}{2}}{b} = \frac{(1,5 + \frac{7,0}{2})1100 + 1,0 \frac{200-500}{2}}{500} = \\ &= \frac{5500 - 150}{500} = 10,7[\text{kg}] \end{aligned}$$

### 4.3.2. Rugós tömegkiegyenlítő mechanizmus

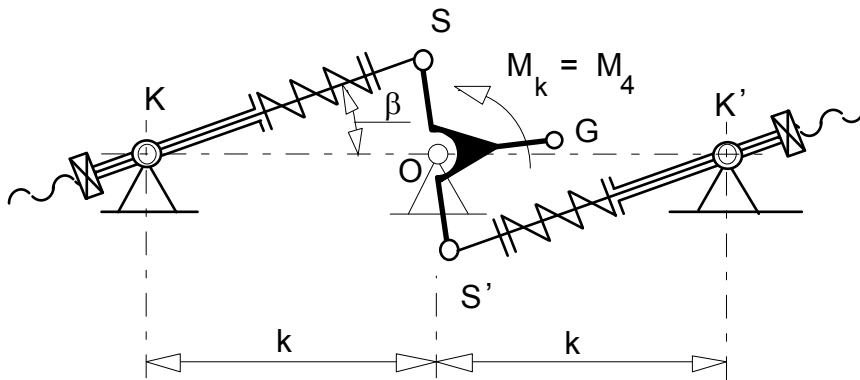
A kiegyenlítő mechanizmus felépítését és a robotmechanikához való kapcsolódását a 4.51. ábra mutatja. A 4 kiegyenlítőten kar a terhelését a 3'



MODELL: TRALLFA TR 4000 Mk - 2

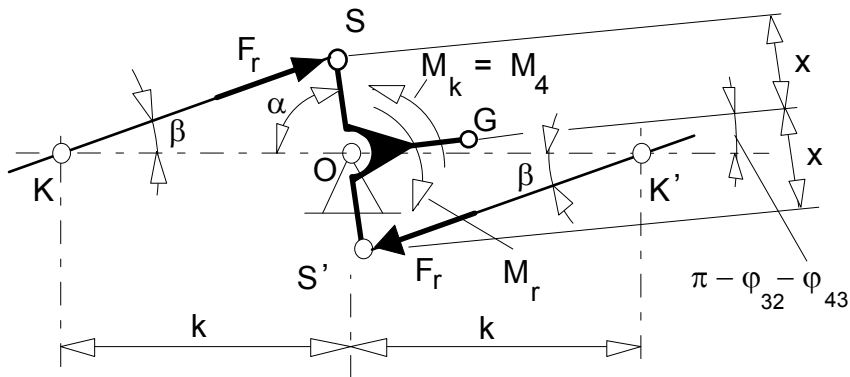
4.51. ábra

rúdon keresztül a G csuklópontban az O pont körül elforduló szög-emelőnek adja át. A szögemelő - szimmetrikus felépítése miatt - az S és az S' pontokban egy forgócsúszka rúdjaához kapcsolódik, amely rúd a rúdon lévő csavarcsavaranya segítségével egy rugót feszít elő. A robotkar terhelésének hatására a szögemelő elfordul, amelynek következtében az S és S' pontok is elmozdulnak, és az előfeszített rugók megterhelődnek.



4.52. ábra

A rugók mindaddig összenyomódnak, amíg rugóerők nyomatéka azonos nem lesz a szögemelőre ható robotkar nyomatékkal (kiegyenlítendő nyomatékkal), amelynek az erőjátékát a 4.53. ábra mutatja.



4.53. ábra

A 4. kar kiegyenlítetlen nyomatéka a (4.51) összefüggésnél tett feltételezések alapján a 4.51. ábra A pontjára felírt nyomatéki egyenlet segítségével itt is

$$M_k = \left[ m_t + \frac{m_{k4}}{2} \left( 1 - \frac{a}{\ell_4} \right) \right] \ell_4 g \cos(\varphi_{43} + \varphi_{32} - \pi) \quad (4.55)$$

összefüggéssel határozható meg. Ezt a nyomatékot kell a 4.52. ábra mechanizmusának kiegyensúlyozni az O pontban. Mivel az ABGO rudak, alkotta négyszög paralelogramma (pantográf), ezért a 4 kar a 3' rúdon keresztül ugyanakkora nyomatékot fejt ki az O pontra, mint az A csuklóra. (4.55)-ből látható, hogy ez a nyomaték a kar helyzetek függvénye. Ezért a tömegkiegyenlítéshez meg kell adni a karhelyzeteket, ( $\varphi_{43}$  és  $\varphi_{32}$ ) amelyekre a kiegyenlítést végezzük. Az előzőekben leírtak alapján belátható, hogy a 4 kar kiegyenlítetlen nyomatéka a kiegyenlítő mechanizmusban egy geometriai helyzetet hoz létre, hiszen a kiegyenlítést biztosító rugóerő össze-függésbe hozható a KS illetve a K'S' szakaszok hosszával. Nézzük meg, hogy a megadott karhelyzeten kívül biztosít-e kiegyensúlyozást a 4 kar számára a rugós mechanizmus. Könnyen belátható, hogy ez csak abban az esetben lehetséges, ha a robotkarok mozgása közben a kiegyenlítő mechanizmus alaphelyzetében marad, tehát (4.55)-ből meghatározott  $M_k$  értéke állandó lesz. Ebben az esetben (4.55)-ből  $\varphi_{43}$  és  $\varphi_{32}$  között egyértelmű összefüggés határozható meg;

$$\varphi_{43} = \pi - \varphi_{32} + \arccos \frac{M_k}{\left[ m_t + \frac{m_{k4}}{2} \left( 1 - \frac{a}{\ell_4} \right) \right] \ell_4 g}, \quad (4.56)$$

illetve,

$$\varphi_{43} = \pi - \varphi_{32} - \arccos \frac{M_k}{\left[ m_t + \frac{m_{k4}}{2} \left( 1 - \frac{a}{\ell_4} \right) \right] \ell_4 g} \quad (4.57)$$

egyenletekkel.

(4.56) és (4.57) összefüggésekből meghatározott szögkoordinátákkal számított trajektóriákon való robot mozgás során a 4 kar kiegyenlített marad.

A 4.53. ábra alapján a rugók által kifejtett kiegyensúlyozó nyomaték

$$M_r = 2k \cdot F_r \cdot \sin\beta, \quad (4.58)$$

ahol  $\beta$  a robothelyzet és a kiegyenlítő mechanizmus geometriája alapján



$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos(\pi - \varphi_{43} - \varphi_{32})}{\frac{k}{x} - \sin(\pi - \varphi_{43} - \varphi_{32})} \quad (4.59)$$

illetve

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\cos(\pi - \varphi_{43} - \varphi_{32})}{\frac{k}{x} - \sin(\pi - \varphi_{43} - \varphi_{32})} \quad (4.60)$$

transzcendens egyenletből határozható meg. A  $k$  és az  $x$  értékét próbálkozással (iteratív úton) lehet meghatározni. A próbálkozásnál abból kell kiindulni, hogy a robot mozgástartományában az  $S$  pont helyzetének vándorlását a rugó alakváltozása követni tudja.

A tömegkiegyenlítéshez szükséges rugóerő (4.58) felhasználásával:

$$F_r = \frac{M_r}{2k \sin \beta} = \frac{M_k}{2k \sin \beta}. \quad (4.61)$$

A 4.52 ábrán lévő kiegyenlítő mechanizmus  $S$  és  $S'$  pontjainak helyzete, a robotnak a mozgástartományban való mozgása során felvett különböző helyzetei miatt változik, ennek következtében a  $KS$  és a  $K'S'$  szakaszok (rugóhosszak) is változnak. A kiegyenlítési helyzetre vonatkozóan az OKS  $\Delta$ -re felírt koszinusz tétel alapján

$$SK = y_0 = y(\varphi_{43}, \varphi_{32}) = \sqrt{x^2 + k^2 - 2kx \cos \alpha}, \quad (4.62)$$

ahol az OKS  $\Delta$ -ből

$$\alpha = \varphi_{43} + \varphi_{32} - \frac{\pi}{2}. \quad (4.63)$$

Ugyanezen számításokat kell elvégezni a robotkarok szélső helyzetét jellemző  $\varphi_{43 \min}$ ,  $\varphi_{43 \max}$ ,  $\varphi_{32 \min}$  és  $\varphi_{32 \max}$  kombinációkra, hogy a rugó összenyomódása illetve  $S$  és  $G$  pontok helyzete meghatározható legyen.

A továbbiakban egy számpélda keretében határozzuk meg egy rugós kiegyenlítő mechanizmus jellemzőit,  $\varphi_{43} = 80^\circ$  és  $\varphi_{32} = 75^\circ$  kiegyenlítési értékre, ha a robot az alábbi adatokkal rendelkezik:

$$\varphi_{43 \min} = 60^\circ,$$

$$\varphi_{43 \max} = 135^\circ,$$

$$\varphi_{32 \min} = 55^\circ,$$

$$\varphi_{32 \max} = 115^\circ,$$

illetve

$$\ell_4 = 1600[\text{mm}] = 1,6[\text{m}],$$

$$\ell_3 = 750[\text{mm}] = 0,75[\text{m}],$$

$$a = 100[\text{mm}] = 0,1[\text{m}],$$

$$m_t = 12,5[\text{kg}],$$

$$m_{k4} = 22,5[\text{kg}],$$

$$g = 9,81[\text{m/s}^2]$$

A 4.51. ábra A pontjára számított kiegyenlítetlen karnyomaték (4.55) alapján

$$\begin{aligned} M_k &= \left[ m_t + \frac{m_{k4}}{2} \left( 1 - \frac{a}{\ell_4} \right) \right] \ell_4 g \cos(\varphi_{43} + \varphi_{32} - \pi) = \\ &= \left[ 12,5 + \frac{22,5}{2} \left( 1 - \frac{0,1}{1,6} \right) \right] \cdot 1,6 \cdot 9,81 \cdot \cos(80^\circ + 75^\circ - 180^\circ) = \\ &= (12,5 + 11,25 \cdot 0,937) \cdot 1,6 \cdot 9,81 \cdot \cos(-25^\circ) = 372,073 \cdot 0,9063 = \\ &= 827,768[\text{Nm}] \end{aligned}$$

A kiegyenlítő mechanizmus geometriai kialakításához próbaként válasszuk a  $k$  és  $x$  értékeket

$$k = 300[\text{mm}] = 0,3[\text{m}],$$

$$x = 150[\text{mm}] = 0,15[\text{m}]$$

-re. A fenti adatokkal a kiegyenlítési helyzetre (4.59) felhasználásával

$$\beta = \arctg \frac{\cos(180^\circ - 75^\circ - 80^\circ)}{\frac{0,30}{0,15} - \sin(180^\circ - 75^\circ - 80^\circ)} = \arctg \frac{\cos 25^\circ}{2 - \sin 25^\circ} = 29,88^\circ,$$

amellyel (4.60) egyenletből a rugóerő

$$F_r = \frac{327,768}{2 \cdot 0,3 \cdot \sin 29,88} = \frac{827,768}{0,2989} = 1096,58[\text{N}]$$

-ra adódik.

A kiegyenlítési helyzetre vonatkozóan (4.61)-ből a

$$SK = y_o = y(\varphi_{43} = 80^\circ, \varphi_{32} = 75^\circ) =$$

$$= \sqrt{0,15^2 + 0,3^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cos(80^\circ + 75^\circ - 90^\circ)} =$$

$$= \sqrt{0,15^2 + 0,3^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cos 65^\circ} =$$

$$= \sqrt{0,0225 + 0,09 - 0,09 \cdot 0,422} = 0,273 [\text{m}] = 273 [\text{mm}].$$

Ugyanezen számításokat el kell végezni a robotkarok mozgástartományának határhelyzeteit jellemző,  $\varphi_{43 \min}$ ,  $\varphi_{43 \max}$ ,  $\varphi_{33 \min}$ , és  $\varphi_{32 \max}$  kombinációkra, azért, hogy a rugók összenyomódása, illetve a szögemelő S és G pontjának helyzete meghatározható legyen.

$$\text{a) } \varphi_{32 \min} = 55^\circ, \varphi_{43 \min} = 60^\circ$$

$$\begin{aligned}
 SK(\varphi_{43 \min}, \varphi_{32 \min}) &= y(\varphi_{43 \min}, \varphi_{32 \min}) = y_1 = \\
 &= \sqrt{0,15^2 + 0,3^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cos(90^\circ - \pi + \varphi_{43 \min} + \varphi_{32 \min})} = \\
 &= \sqrt{0,0225 + 0,09 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cos 25^\circ} = \\
 &= \sqrt{0,0225 + 0,09 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cdot 0,906} = \\
 &= \sqrt{0,1125 - 0,081} = 0,176[\text{m}] = 176[\text{mm}]
 \end{aligned}$$

$$\text{b) } \varphi_{32 \min} = 55^\circ, \varphi_{43 \max} = 135^\circ$$

$$\begin{aligned}
 SK(\varphi_{43 \min}, \varphi_{32 \max}) &= y(\varphi_{43 \min}, \varphi_{32 \max}) = y_2 = \\
 &= \sqrt{0,0225 + 0,09 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cos 100^\circ} = \\
 &= \sqrt{0,1125 + 0,09 \cdot 0,1736} = \sqrt{0,1125 + 0,0156} = \\
 &= 0,358[\text{m}] = 358[\text{mm}].
 \end{aligned}$$

$$\text{c) } \varphi_{32 \max} = 115^\circ, \varphi_{43 \min} = 60^\circ$$

$$\begin{aligned}
 SK(\varphi_{43 \min}, \varphi_{32 \max}) &= y(\varphi_{43 \min}, \varphi_{32 \max}) = y_3 = \\
 &= \sqrt{0,0225 + 0,09 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cos 85^\circ} = \\
 &= \sqrt{0,1125 + 0,09 \cdot 0,087} = 0,324[\text{m}] = 324[\text{mm}]
 \end{aligned}$$

$$d) \varphi_{32 \max} = 115^\circ, \varphi_{43 \max} = 135^\circ$$

$$SK(\varphi_{43 \max}, \varphi_{32 \max}) = y(\varphi_{43 \max}, \varphi_{32 \max}) = y_4 =$$

$$= \sqrt{0,0225 + 0,09 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cos 160^\circ} =$$

$$= \sqrt{0,1125 + 0,09 \cdot 0,93} = 0,444 [\text{m}] = 444 [\text{mm}]$$

Elvégezve a karok határ szöghelyezeteihez tartozó szögemelő helyzetek számítását (4.62) összefüggés alapján, akkor

$$-\varphi_{32 \min} = 55^\circ \quad \text{és} \quad \varphi_{43 \min} = 60^\circ \text{-ra}$$

$$\alpha = 60^\circ + 55^\circ - 90^\circ = 25^\circ,$$

$$-\varphi_{32 \min} = 55^\circ \quad \text{és} \quad \varphi_{43 \max} = 135^\circ \text{-ra}$$

$$\alpha = 135^\circ + 55^\circ - 90^\circ = 100^\circ,$$

$$-\varphi_{32 \max} = 115^\circ \quad \text{és} \quad \varphi_{43 \min} = 60^\circ \text{-ra}$$

$$\alpha = 60^\circ + 115^\circ - 90^\circ = 85^\circ,$$

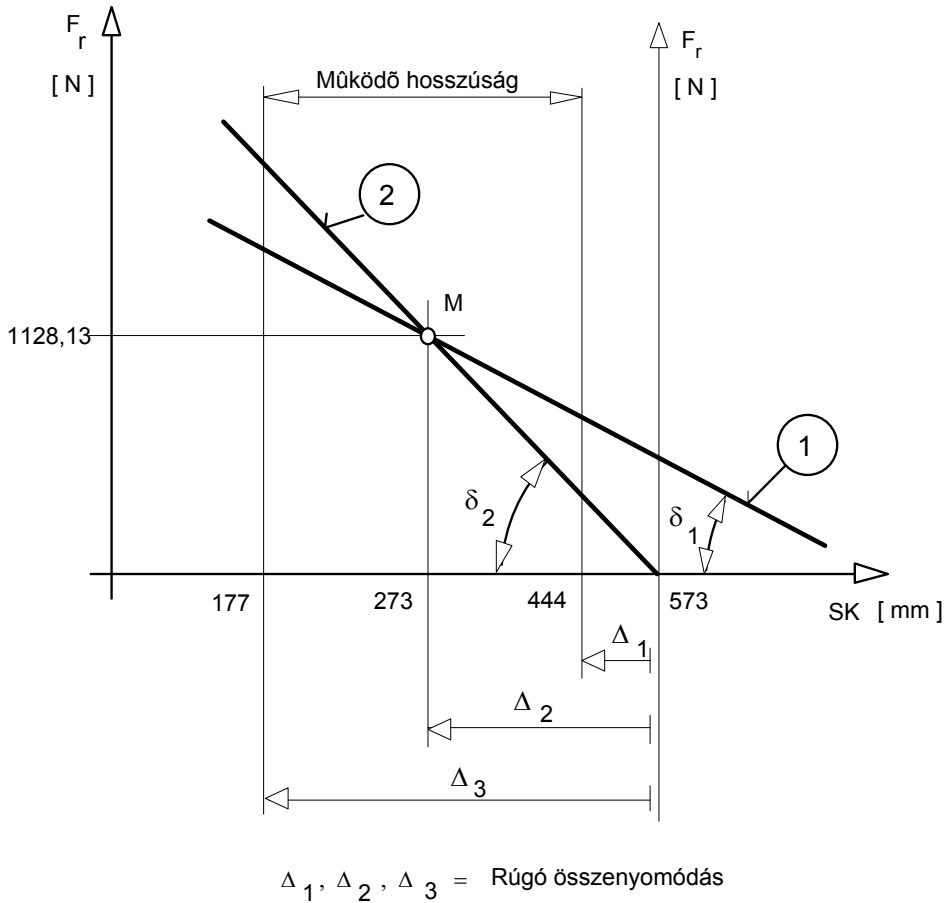
$$-\varphi_{32 \max} = 115^\circ \quad \text{és} \quad \varphi_{43 \max} = 135^\circ \text{-ra}$$

$$\alpha = 135^\circ + 115^\circ - 90^\circ = 160^\circ$$

adódik. A számításokból látható, hogy a kiegyenlítő szerkezet szögemelőjének SS' karja  $25^\circ \leq \alpha \leq 160^\circ$  szögtartományban mozog. A szerkezet működésében instabilitás nem lép fel, mert sem az S sem pedig az S' pont nem billen át a KOK' pontok által meghatározott egyenesen.

A kiegyenlítési helyzetre végzett rugóerő számítás alapján megállapítható volt, hogy  $F_r = 1096,58 [\text{N}]$  rugóerőhöz  $y_o = 273 [\text{mm}]$  geometriai távolság tartozik. A karok mozgástartományára vonatkoztatva a működő

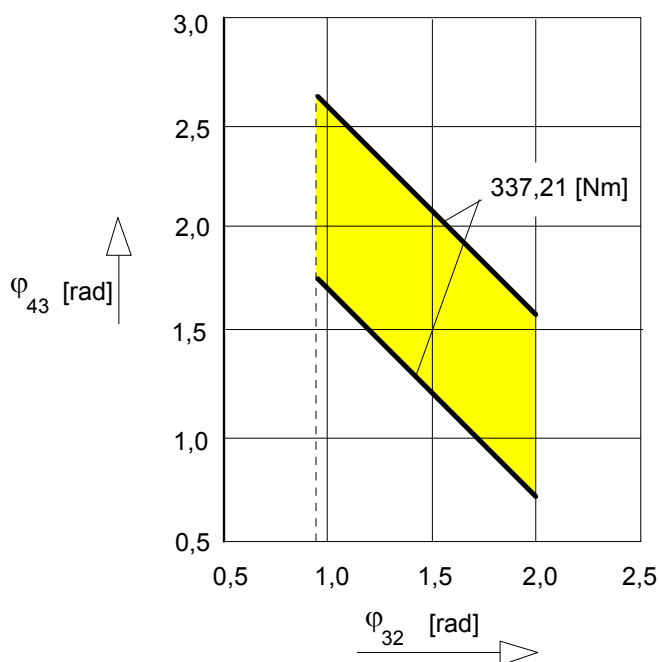
SK tartomány pedig 176 [mm] és 444 [mm] között változik. A kapott adatok alapján megszerkeszthető a 4.54. ábra rugókarakterisztikája.



4.54. ábra

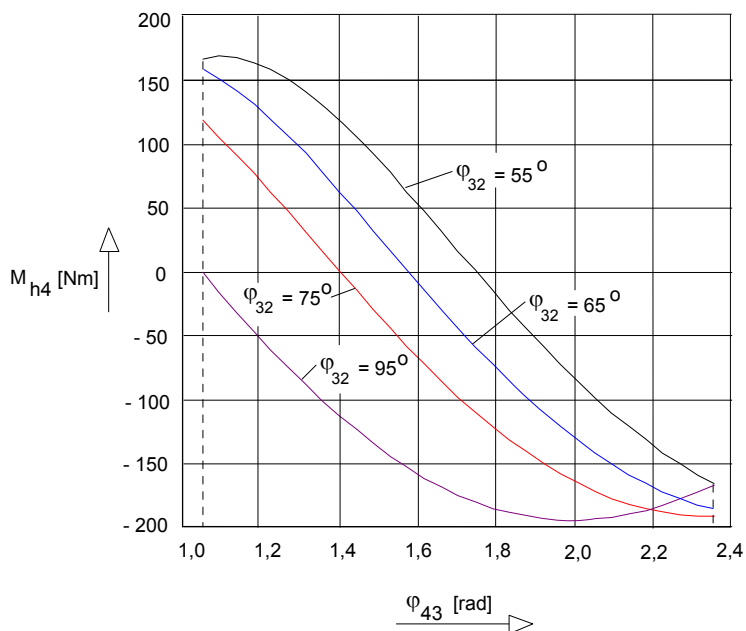
Az ábra alapján látható, hogy minden olyan egyenes, amely keresztülmegy az M ponton és a vízszintes tengelyt a kiegyenlítő szerkezet működési tartományán kívül metszi, kielégíti a működő rugó karakterisztikáját.

A robot mozgástartományában a kiegyenlített állapothoz tartozó, (4.56) és (4.57) egyenletekkel meghatározott szögkoordináta értékeket a 4.55. ábra mutatja. Az ettől eltérő szögkoordináták által megvalósított



4.55. ábra

mozgásban a 4 kar terhelése a kiegyenlítő szerkezet helyzetének megfelelő rugónyomatékkal módosul, ez a módosított nyomaték a 4.56. ábrán látható.



4.56. ábra

#### 4.4. Robotok hajtási rendszerei

A 4.1.6. fejezetpontban megállapítottuk, hogy a robotmechanika határozatlanságát a kényszerekben alkalmazott megfelelő kinematikai előírásokkal fel tudjuk oldani, azaz kinematikailag határozottá tehetjük. A szóban forgó kinematikai előírásokat a hajtásokkal realizálhatjuk.

A hajtási rendszerek feladata a robotmechanika, kinematikai határozottságának biztosításán túl az, hogy az irányítórendszer utasításainak megfelelően a robot TCP pontját megkívánt pontossággal az előírt pályán mozgassa, illetve egy meghatározott pozícióba helyezze. A roboton alkalmazott hajtórendszerek száma megegyezik a robotmechanika határozottsági fokának (határozatlansági fokának) (4.37)-ből meghatározható értékével. Robotok esetében ez általában 6 szokott lenni, de előfordul az 5 és a 7 érték is. Ennek bővebb magyarázatát az 5. fejezetben fejtjük ki.

A hajtórendszerek egyedileg is, és összességében is, programozott mozgásokat valósítanak meg. A programozott mozgásokat a számjegyes irányítás (NC) "*tengelyeknek*" nevezi. E fogalom bevezetésével a robotok a



"tengelyek" számával is jellemezhetők, így megkülönböztethetünk 5, 6 és 7 tengelyes robotokat.

A robotkarokat egymáshoz kapcsoló kényszerek által meghatározott mozgásformák meghatározzák az alkalmazható hajtó rendszereket. E szerint megkülönböztethetők:

- lineáris mozgást,
- forgó mozgást

megvalósító hajtórendszerek. A hajtórendszerek a karokat közvetlenül, vagy áttételeken (mozgásátalakítók, mechanizmusok) keresztül működtetik.

A robot hajtási rendszerek energiaforrásaikat tekintve:

- pneumatikus,
- hidraulikus,
- villamos

hajtásokként csoportosíthatók. Az egyes csoportokon belül méreteit és működési módját tekintve több típust fejlesztettek ki. Ezek egyenként is külön technikai érdekességet jelentenek, pl. a mikro robotok hajtórendszerei. A könyv keretében azonban csak a klasszikus hajtási rendszereket ismertetjük.

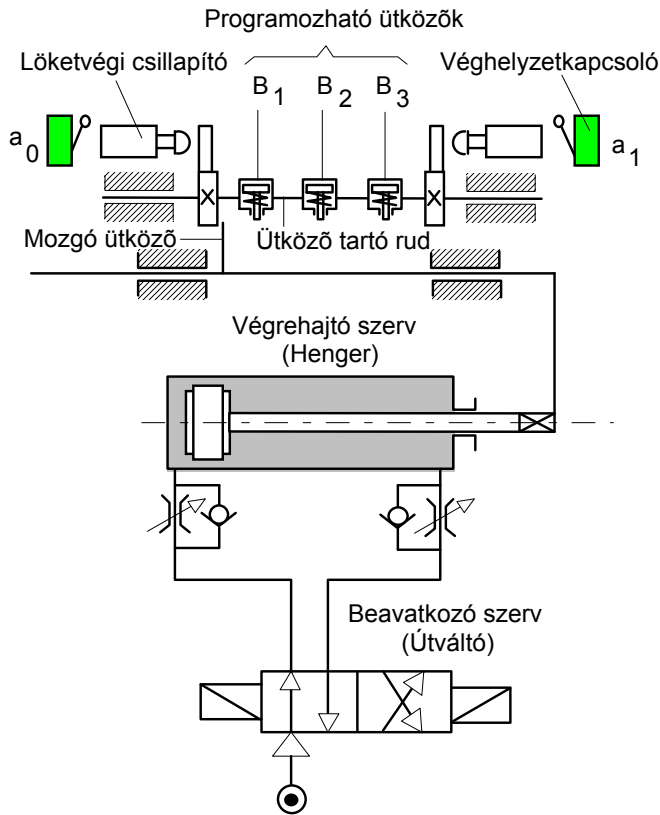
A hajtási rendszerek jellemző paraméterei, amelyek a robot teljesítőképességét döntően meghatározzák:

- sebesség, szögsebesség,
- hajtónyomaték, hajtóerő,
- a hajtás dinamikai tulajdonsága,
- a programozott helyzet megközelítési módja, a pozicionálás.

A továbbiakban az energiaforrás szerinti csoportosításokban tekintjük át a hajtási rendszereket.

#### **4.4.1. Pneumatikus hajtási rendszerek**

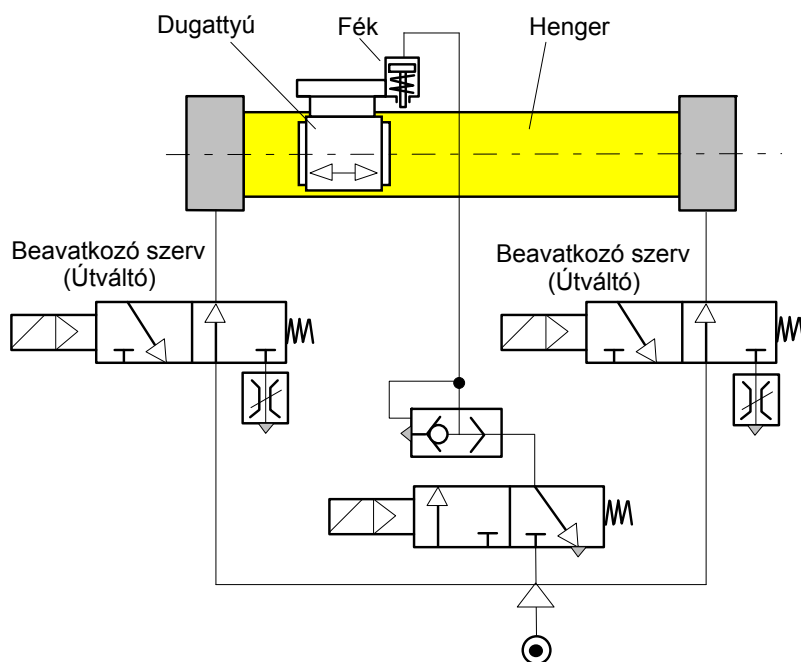
A hajtórendszer végrehajtószerve a lineáris mozgást megvalósító munkahenger vagy a pneumatikus forgómotor. A végrehajtószervek mozgását a beavatkozószervek irányítják, amelyek mágnesekkel működtetett útváltó szelepek. Egy pneumatikus hajtórendszer felépítését a 4.57. ábra mutatja.



4.57. ábra

A pneumatikus henger által mozgatott robotkar a dugattyúrúdhoz kapcsolható. A dugattyúrúdhoz kapcsolódik egy vele párhuzamos mozgást végző mozgó ütközőt tartalmazó rúd is. A mozgó ütköző mozgástartományát az ütköző tartó rúdon lévő fix- illetve programozható ütközőkkel határozhatjuk meg. A fix ütközők távolsága megegyezik a pneumatikus henger lökethosszával. E tartományon belül a programozható ütközők szabadon elhelyezhetők, általában helyzetük változtatható. Programozható ütközőként általában speciális kialakítási pneumatikus hengereket alkalmaznak, amelyek a dugattyú működtetésével aktivizálják az ütköző működő (programozott) helyzetét. A mozgó ütköző a mozgás-határoló ütközőt elérve az ütközőtartó rudat a lökétvégi csillapító szerkezetig mozgatja, majd annak kismértékű elmozdítása után a véghelyzet-kapcsoló működtetésével a mozgásirány megváltoztatható, vagy a programozott helyzetben való maradás fenntartható. A lökétvégi csillapítók szerkezeti kialakítása olyan, hogy a csillapítási út végén me-reven felütközik, így az útkijelölés szempontjából merev ütközőnek számít.

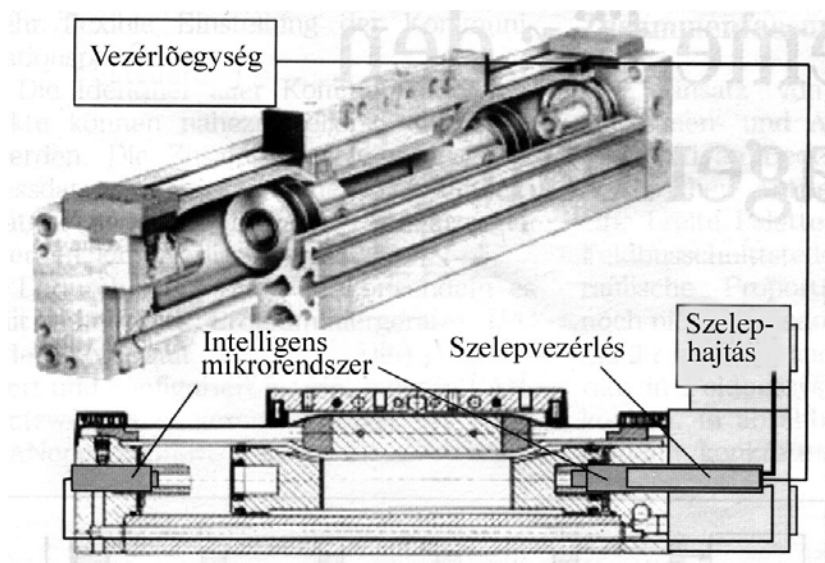
A teljes mozgástartományban való programozhatóságot fékhengerrel megvalósító rendszert mutat a 4.58. ábra.



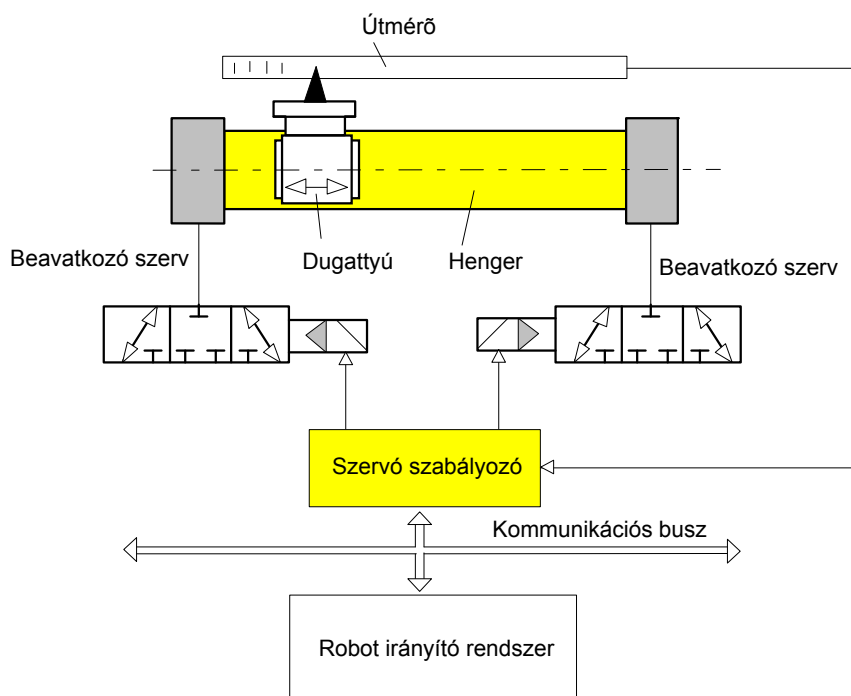
4.58. ábra

A korszerű hajtástechnikai fejlesztések főleg a pneumatikus lineáris hajtási rendszerek területén új eredményeket hoztak. Alkalmazása iránti igény különösen az automatizált berendezések előállítása során nőtt meg, ahol követelmény a finombeállítás és a szabályozás. A pneumatikus végrehajtószervek (hengerek) erős nemlineáris tulajdonsága miatt a fenti követelményeknek megfelelő hajtás csak szenzorbázisú szabályozással valósítható meg.

A szenzorok szenzorfejekben helyezkednek el. Egy szenzorfej általában a nyomásszenzort, az útmérő rendszert, a jelfeldolgozó egységet, a végrehajtó szerv csatlakozó egységet és a kommunikációs építőelemet is magába foglalja (4.59. ábra). A fenti hajtási rendszernek az irányító rendszerhez való illesztését mutatja a 4.60. ábra



4.59. ábra



4.60. ábra

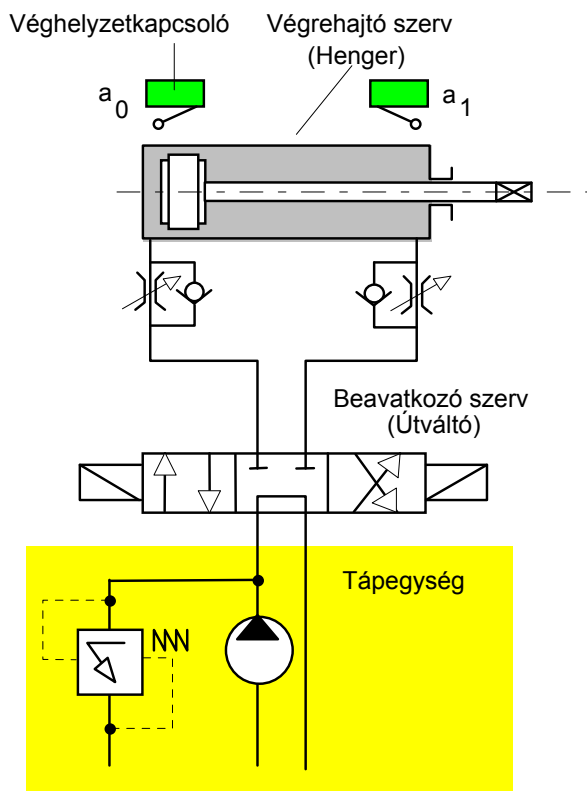
Ezeket a hajtási rendszereket ma már ritkán és csak alárendelt szerepet betöltő robotoknál használják. Karbantartást alig igényelnek, üzemben tartásuk olcsó. A sebességet a kiáramló ágba elhelyezett fojtással lehet beállítani a szükséges értékre.

#### 4.4.2. Hidraulikus hajtási rendszerek

A hidraulikus hajtórendszerek két változata terjedt el:

- hidrosztatikus,
- szabályozott szervo rendszer.

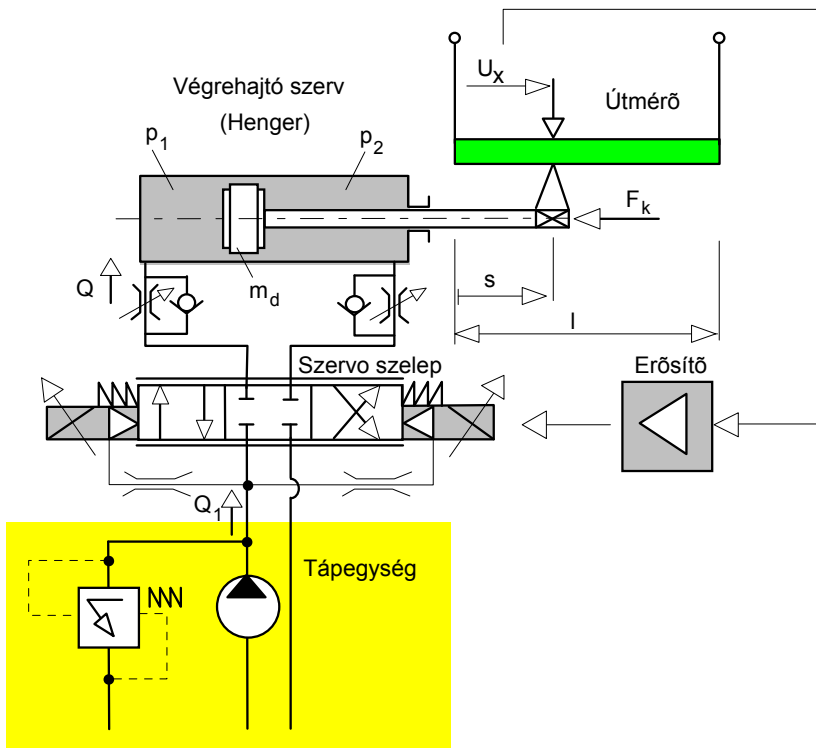
A hidrosztatikus hajtórendszer felépítését a 4.61. ábra mutatja. A hajtórendszer végrehajtó szerve a pneumatikus hajtáséhoz hasonlóan itt is a lineáris mozgást megvalósító munkahenger vagy forgómozgást létrehozó hidromotor.



4.61. ábra

A végrehajtószervek mozgását mágnesekkel működtetett útváltó szelepek irányítják. A mozgások létrehozásához szükséges segéd-energiát (nyomási energiát) egy külön tápegység szolgáltatja. Az energia közvetítő hidraulikus munkaközeg nyomása általában egy nagyságrenddel nagyobb mint a pneumatikus hajtórendszerekben szokásos. A gyakorlati tapasztalat szerint 10 Mpa nyomás érték elegendő ahhoz, hogy a hidraulikus hajtórendszerekkel elérhető legyen 10 kW/kg teljesítmény-tömeg arány.

A szabályozott szervo hajtási rendszer lehetőséget biztosít a mozgástartományon belüli tetszőleges helyzetre való pozicionálásra. Ehhez a hajtási rendszert útmérővel kell kiegészíteni. A korszerű robotohajtásoknál az útmérő rendszer a hengerbe be van építve, vele egy egységet képez. Az útváltó áramvezérelt különleges szelep ún. szervoszelep, amelyben az átömlő rés nagyságát meghatározó tolattyú állást az előírt és a tényleges helyzet különbségi jeléből képzett áram jel határozza meg - 4.62. ábra.

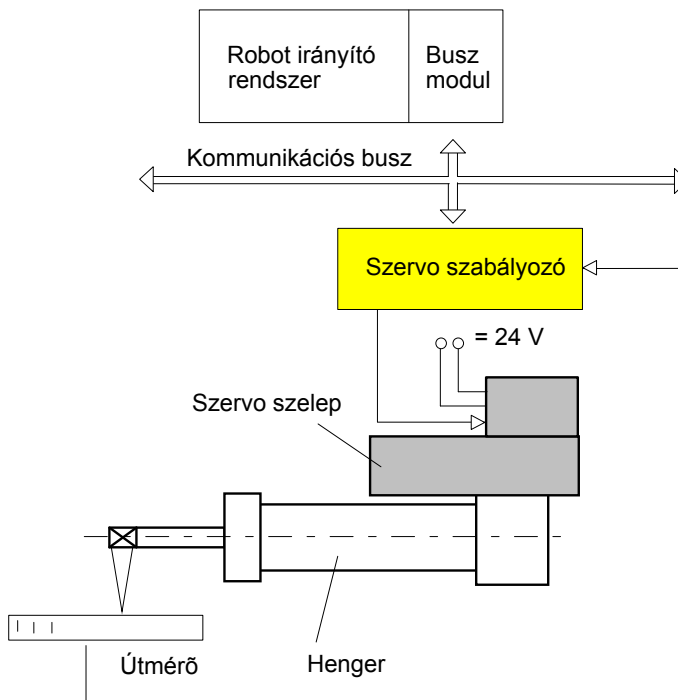


4.62. ábra



A tolattyú középhelyzetében ( $\varepsilon = 0$ ) a  $c_1$  rugók előfeszített állapotban vannak, s az előfeszítés mértéke akkora, hogy a tolattyú legnagyobb üzemi elmozdulása ( $\pm \varepsilon_{0\max}$ ) esetén sem kerül egyik rugó sem feszültségmentes állapotba.

A hidraulikus hajtási rendszereknek a robot irányító rendszerével való kapcsolódását a 4.64. ábra mutatja.



4.64. ábra

A 4.62. ábrán lévő hidraulikus hajtás által megvalósított mozgás az alábbi egyenletekkel írható le;



$$Ap_d = m_d \ddot{s} + B\dot{s} + F_k,$$

$$Q = A\dot{s} + C_t p_d + \frac{V}{4\beta} \dot{p}_d,$$

(4.64)

$$Q = Q_1 - k_c p_d,$$

$$k_1 I = C_1 Q_1 + C_2 \dot{Q}_1 + \ddot{Q}_1,$$

ahol  $Q_1$  az elméleti  $Q$  pedig valós folyadékáramlás [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $A$  a hidraulikus henger dugattyú területe [ $\text{m}^2$ ],  $C_t$  a külső és belső veszteségek átlagértéke

$$\left[ \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{N}/\text{m}^2} \right], p_d \text{ a hidraulikus henger két oldalán lévő nyomások redukált kü-}$$

lönbsége  $p_d = \pm (p_1 - \alpha p_2)$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ], ahol  $\alpha$  a dugattyúfelületek hányadosa,  $\beta$  a hidraulika olaj összenyomhatósági tényezője [ $\text{N}/\text{m}^2$ ],  $V$  a hidraulikus henger térfogata [ $\text{m}^3$ ],  $m_d$  a dugattyú tömege [ $\text{kg}$ ],  $F_k$  a dugattyúra ható külső erő [ $\text{N}$ ],  $k_c$  a szervoszelep karakterisztika meredeksége a munkapontban

$$\left[ \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{N}/\text{m}^2} \right], k_1 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3 \text{mA}} \right], C_1 \left[ \frac{1}{\text{s}^2} \right], \text{ és } C_2 \left[ \frac{1}{\text{s}} \right] \text{ a szervoszelepet jellemző té-}$$

nyezők. Ha (4.60) -ban lévő változókból képezzük az

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} s & \dot{s} & p_d & Q_1 & \dot{Q}_1 \end{bmatrix}^T \quad (4.65)$$

állapot vektort, akkor (4.64)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f}F_k + \mathbf{b}I \quad (4.66)$$

típusú mátrixegyenletben foglalható össze. (4.66) mátrix egyenlet a robot valamennyi tengelyére felírható, így a robot hajtása tengelyenként

$$\dot{\mathbf{x}}^i = \mathbf{A}^i \mathbf{x}^i + \mathbf{f}^i F_k^i + \mathbf{b}^i I^i \quad (4.67)$$

mátrixegyenlettel jellemezhető, ahol  $i = 1 \dots N$  a robot tengelyek (programozott mozgások) számát jelenti. (4.65) deriválásával

$$\dot{\mathbf{x}} = [\dot{s} \quad \ddot{s} \quad \dot{p}_d \quad \dot{Q}_1 \quad \ddot{Q}_1]^T \quad (4.68)$$

vektort kapjuk eredményül, amellyel (4.65) és (4.67) figyelembevételével (4.64) az alábbi alakba írható:

$$\dot{s} = \dot{s},$$

$$\ddot{s} = -\frac{B}{m_d} \dot{s} + \frac{A}{m_d} p_d - \frac{F_k}{m_d},$$

$$\dot{p}_d = -\frac{4\beta A}{V} \dot{s} - \frac{4\beta(k_C + C_t)}{V} p_d + \frac{4\beta}{V} Q_1, \quad (4.69)$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_1,$$

$$\ddot{Q}_1 = -C_1 Q_1 - C_2 \dot{Q}_1 + k_1 I.$$

(4.69) egyenletrendszer alapján (4.67) mátrixegyenlet jellemzői;

$$\mathbf{A}^i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{m_d} & \frac{A}{m_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4\beta A}{V} & -\frac{4\beta(k_C + C_t)}{V} & \frac{4\beta}{V} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -C_1 & -C_2 \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

$$\mathbf{f}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{m_d}{0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.71)$$

$$\mathbf{b}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_1 \end{bmatrix}. \quad (4.72)$$

A hidraulikus hajtású robotok száma is ma már csekély. Alkalmazásuk azonban nem nélkülözhető a nagy teherbírású és a robbanás-veszélyes környezetben dolgozó robotok esetén. A festő robotokban ezért alkalmazzák mind a mai napig szinte kizárólagosan a hidraulikus hajtó rendszereket.

#### 4.4.3. Villamos hajtási rendszerek

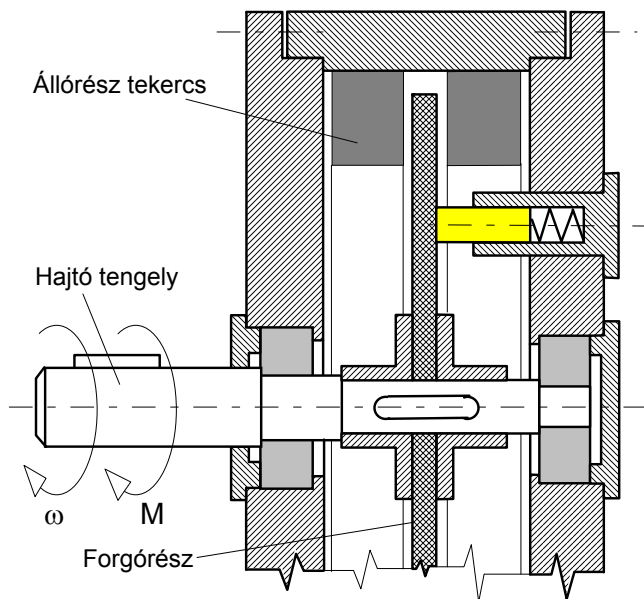
Napjainkban az ipari robotok hajtását szinte kizárólagosan villamos hajtási rendszerekkel realizálják. Ennek elsődleges oka, a teljesítményelektronika és a mikroelektronika fejlesztésében elért óriási eredmények, az ebből következő üzembiztonság és a teljesítményelektronika mikroszámítógéppel való irányíthatóságából adódó pontosság.

A robotok mozgási folyamatával szemben az általa kiszolgált technológiák olyan követelményeket támasztanak, amelyek a hagyományos villamos gépekkel nem teljesíthetők. A mozgást megvalósító motoroktól megkívánják, hogy indítónyomatékuk és nyomaték túlterhelhetőségük nagy legyen, a nyomaték független legyen a forgórész helyzetétől, nagy gyorsulással indítsanak és fékezzenek, a fordulatszám tartomány nagy, a méretek pedig kicsik legyenek. A fenti feltételeknek megfelelő új konstrukciós elvek a robotok hajtására két motortípust hoztak létre:

- egyenáramú szervomotor,
- villamos léptetőmotor.

### a) Egyenáramú szervomotorok

Az egyenáramú szervomotorok (használatos a DC motor elnevezés is) közül a robot hajtásokban a serleges tárcsamotorok terjedtek el. Felépítésüket a 4.65. ábra mutatja. A forgórész vékony szigetelőtárcsa, amelynek homlokfelületére rézfóliából kivágott áramvezetőket ragasztanak.

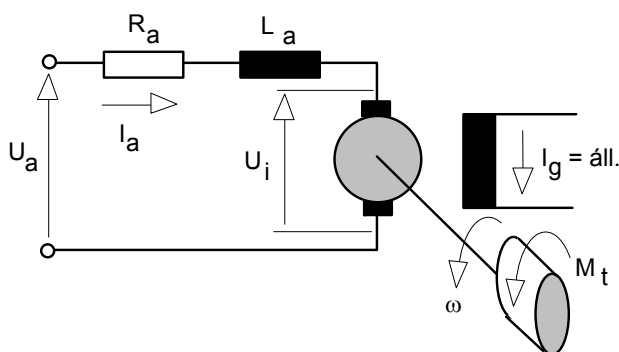


4.65. ábra

Így a motor konstrukciója axiális irányban különlegesen kisméretű lehet. A vezetők radiális elhelyezésével a tárcsán nagy hőszugárzó felületet kapunk, ezért rövid időre igen nagy áramtűlterhelés lehetséges, úgy hogy impulzus üzemben rendkívül nagy indítónyomaték érhető el.

Az áram hozzávezetés közvetlenül a rézfólián felfekvő keféken keresztül történik. A permanens mágneseket általában a motorház egyik oldalára szerelik, a mágneses kört ez esetben a ház zárja. A gyakorlatilag homogén légrés fluxus a forgórészt merőlegesen járja át. Teljesítményük felső határa kb. 10[kW], időállandójuk  $\tau_M \cong 10[\text{ms}]$ .

Áramköri vázlatukat a 4.66. ábra mutatja. A motorok fordulatszám szabályozását az armatúra körben az armatúra feszültség vagy az armatúra áram változtatásával végezzük. A 4.66. ábra jelöléseit felhasználva



4.66. ábra

az armatúra körre felírható az

$$U_a - U_i = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} = R_a I_a + L_a \dot{I}_a \quad (4.73)$$

egyenlet, ahol az  $U_i$  indukált feszültség a gerjesztő áram és a szögsebesség ismeretében

$$U_i = k_g I_g \omega = k_g I_g \dot{q} \quad (4.74)$$

összefüggéssel határozható meg. (4.73) és (4.74) -ből az armatúra feszültségre

$$U_a = R_a I_a + L_a \dot{I}_a + k_g I_g \dot{q} \quad (4.75)$$

adódik. A motor által kifejtett nyomaték (légrés nyomaték)

$$M = k_m I_g I_a \quad (4.76)$$

amely a tömeggyorsításra, a súrlódások legyőzésére és a külső terhelésre fordítódik. A motor tengelyére perdülettelét felírva

$$M - M_t = J \ddot{q} + C_v \dot{q} \quad (4.77)$$

összefüggést kapjuk, ahol  $J$  a forgórész tehetetlenségi nyomatéka,  $M_t$  a külső terhelés,  $C_v$  a szögsebességgel arányos veszteségi tényező. (4.76) -t (4.77)-ba helyettesítve és rendezve

$$M_t = -J\ddot{q} - C_v\dot{q} + k_m I_g I_a \quad (4.78)$$

egyenlethez jutunk. A fentiekből látható, hogy a villamos motor mozgását (4.75) és (4.76) egyenletek írják le. Ha e két egyenlet alkotta egyenletrendszer változóiból képezzük az

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} q & \dot{q} & I_a \end{bmatrix}^T \quad (4.79)$$

állapotvektort, akkor az egyenletrendszer (4.66)-hoz hasonlóan itt is

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f}M_t + \mathbf{b}U_a \quad (4.80)$$

alakú mátrixegyenletben foglalható össze. (4.79) deriválásával

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{q} & \ddot{q} & \dot{I}_a \end{bmatrix}^T \quad (4.81)$$

vektorhoz jutunk, amelynek segítségével (4.75) és (4.78) alkotta egyenletrendszer átalakítható a (4.80) szerinti struktúrára;

$$\dot{q} = \dot{q},$$

$$\ddot{q} = -\frac{C_v}{J}\dot{q} + \frac{k_m I_g}{J}I_a - \frac{M_t}{J}, \quad (4.82)$$

$$\dot{I}_a = -\frac{k_g I_g}{L_a}\dot{q} - \frac{R_a}{L_a}I_a + \frac{U_a}{L_a}.$$

A 4.4.2. fejezetpontban kifejtettek alapján itt is érvényes, hogy a robot valamennyi tengelyére felírható egy (4.80) alakú egyenlet, illetve (4.82) egyenletrendszer az alábbi formában:

$$\dot{\mathbf{x}}^i = \mathbf{A}^i \mathbf{x}^i + \mathbf{f}^i M_t^i + \mathbf{b}^i U_a^i, \quad (4.83)$$

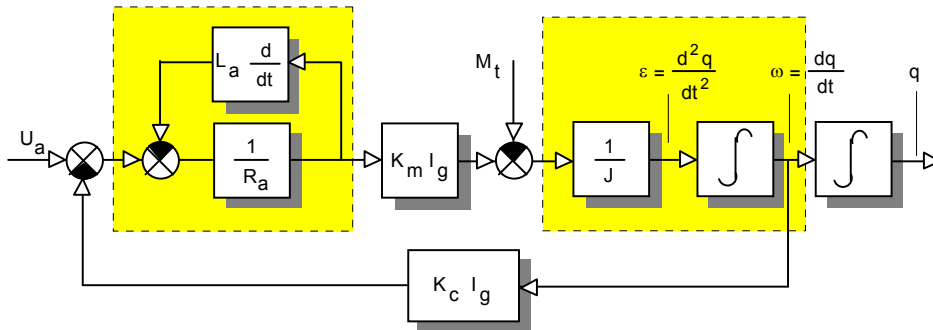
ahol  $i = 1 \dots N$ . (4.82) és (4.83) alapján a mátrixegyenlet jellemzői;

$$\mathbf{A}^i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{C_v}{J} & \frac{k_m I_g}{J} \\ 0 & \frac{k_g I_g}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix}, \quad (4.84)$$

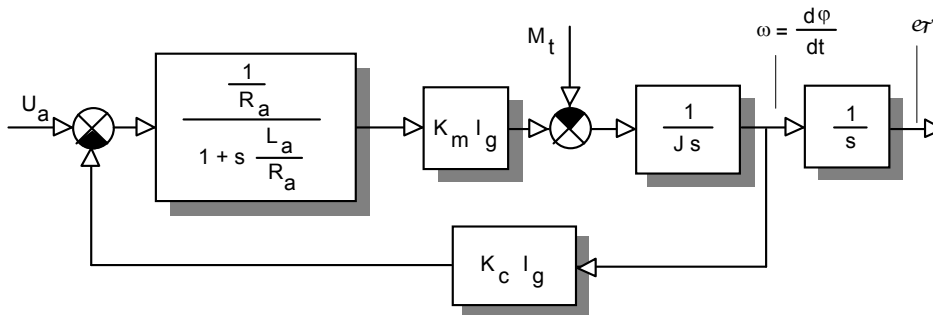
$$\mathbf{f}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.85)$$

$$\mathbf{b}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix}, \quad (4.86)$$

(4.83) mátrix differenciálegyenlet megoldásából megállapítható, hogy a motor szögsebességét (fordulatszámát) a külső terhelő nyomaték és az armatúra feszültség határozza meg. Ez látható az egyenletrendszer hatás-vázlatán is, amit  $C_v$  elhanyagolásával a 4.67. ábra mutat időtartományban, a 4.68. ábra pedig operátor tartományban.

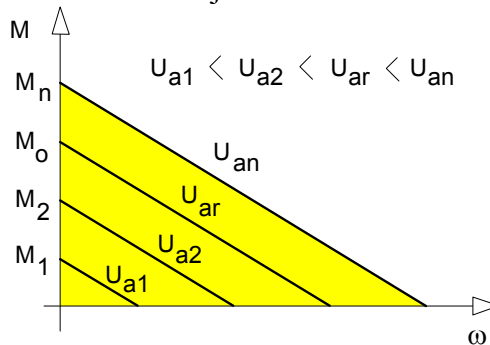


4.67. ábra



4.68. ábra

Az armatúra feszültséget tirisztoros vezérlőkapcsolással lehet változtatni, amit az ún. teljesítmény elektronika realizál. Az egyenáramú (DC) motorok nyomaték-szögsebesség jelleggörbéjét (4.83) mátrixegyenletben összefoglaltak alapján a 4.69. ábra mutatja.



4.69. ábra



## b) Léptetőmotorok

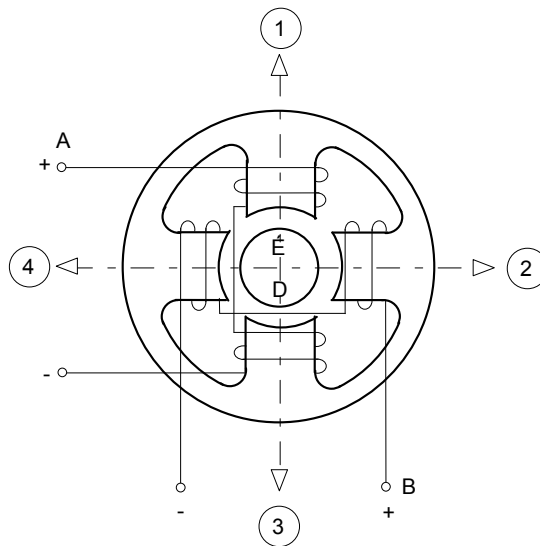
A villamos léptetőmotor többfázisú, sokpólusú különleges kialakítású villamosgép, amelynek alapvető tulajdonsága az, hogy fázis-tekercseit értelemszerű kombináció szerint gerjesztve, a motor tengelyén diszkrét szögelfordulások jönnek létre. Ezen szögelfordulások a konstrukció kialakításától függően kicsik is lehetnek ( $1^\circ \div 2^\circ$ ), és az egymás utáni bekövetkezésük nullától több 10 kHz frekvenciával történhet.

Régebben ezeket a kis lépésszögű gyorsműködésű léptetőmotorokat csak nagyon kis kimenőnyomatékkal tudták előállítani. Ezek nem tették lehetővé a robotkar közvetlen mozgását, így alakultak ki a követőrendszer elvén alapuló, nagy nyomatékú elektrohidraulikus léptetőmotorok.

A villamos és mágneses anyagok, továbbá a gyártástechnológia fejlődése lehetővé tette a nagy nyomatékú, kis lépésszögű és gyors működésű villamos léptetőmotorok kialakítását, amelyek már alkalmasak a robotkarok és a szerszámgépek szánjainak közvetlen mozgására is. Ezek a villamos léptetőmotoros hajtások az alábbi tulajdonságokkal bírnak:

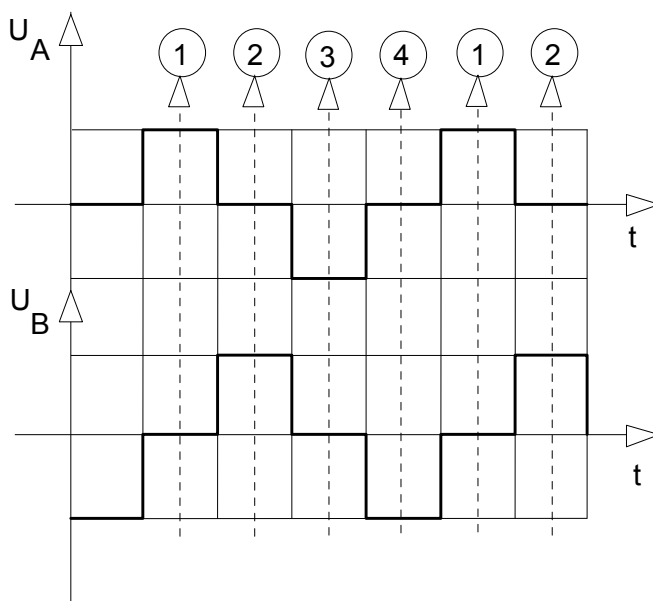
- digitális jel hatására a kimenőtengely diszkrét szögelfordulása könnyen alakítható át diszkrét hosszmozdulássá, tulajdonságánál fogva egyesíti magában a mérőrendszert is,
- könnyen és pontosan szabályozható (frekvencia szabályozás),
- start-stop frekvencia alatt közvetlenül indítható, megállapítható, munkameneti méretre állásnál nem kell fordulat leszabályozást alkalmazni,
- a nem működő koordináta rögzítését alapvető képességénél fogva elvégzi,
- több koordináta egyidejű, egymással kapcsolt mozgatása (interpolátor alkalmazása) a pontos frekvenciaszabályozással kedvezően megoldható,
- a start-stop frekvenciák feletti üzemmódban frekvencia fel és lefuttatás szükséges, mely az adott maximális frekvenciára vonatkoztatva a terhelőnyomatéktól és a tehetetlenségi nyomatéktól függően 200-600 ms.
- nem igényel karbantartást, rossz környezeti feltételek mellett is üzemeltethető.

A léptetőmotorok gerjesztett vagy gerjesztetlen forgórésze, egy-két, három, négy vagy még több fázisú kivitelben készülnek. Elvi felépítését a 4.68. ábra mutatja.



4.70. ábra

Működési elve a 4.69. ábrán lévő állórész gerjesztést feltételezve az alábbi. Ha az A és B tekercseket egymásután  $90^\circ$ -kal eltolt fázisú impulzusokkal gerjesztjük, az állórész mágneses mező fluxusa forgást végez. A gerjesztő impulzusok feletti számok a mágnes mező irányából adódó motorhelyzetet mutatják.

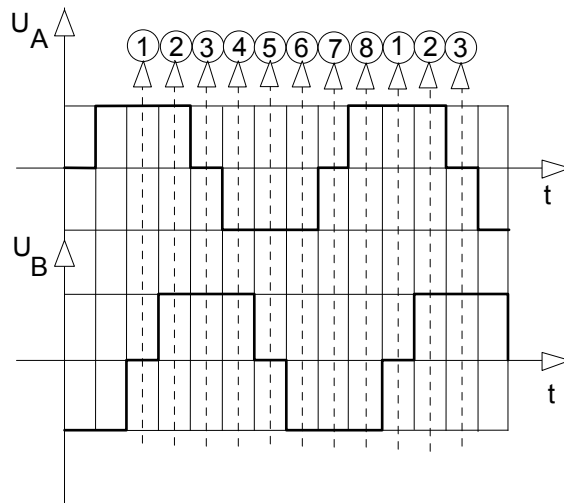


4.71. ábra

A 4.71. ábrán lévő gerjesztés 90°-os, a 4.70. ábra gerjesztése pedig 45°-os felbontást tesz lehetővé.

A 4.69. ábrán lévő elvi felépítésű motor póluspárjainak növelésével a motor lépésszöge csökken, megfelelő gerjesztés alkalmazásával kisebb szögfelbontás hajtható végre. A póluspárok növelésének a motorok radiális méretei szabnak határt. Axiális irányban azonban lehetőség nyílik a póluspárok növelésére, ha egymástól független póluspár rétegeket alakítunk ki, egymáshoz a lépésszög mértékének megfelelő elfordítással. Az egyes rétegekhez vagy a 4.71. vagy a 4.72. ábrán lévő gerjesztési függvények tartoznak. A gerjesztések hatására a permanens mágneses rotor az eredő fluxus irányába akar beállni és így követi a mező forgását.

A léptetőmotorok külső szerkezeti kialakításukat tekintve hűtőborda nélküli és hűtőbordás kivitelűek. Tengelykapcsolóval közvetlenül a hajtandó egységhez kapcsolható, a homloklapján lévő csavarhelyek lehetővé teszik a homloklapon való felfogását.



4.72. ábra

A léptetőmotorok üzemtani jellemzői a DIN 42021 szerint az alábbiakban foglalhatók össze;

- Lépésszám ( $z$ ): azon lépések száma, amelyet a motor fordulaton-ként végez,
- Lépésszög ( $\alpha$ ): az a névleges szög, amelyet a motor egy vezérlőimpulzusra elfordul,

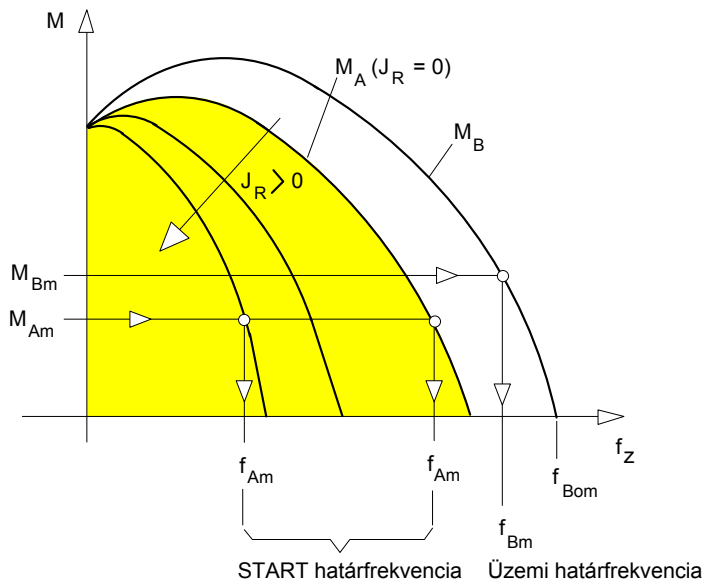
$$\alpha^{\circ} = \frac{360^{\circ}}{z}$$

- Lépésszám ( $f_z$ ; Hz): az a lépésszám, amelyet a rotor konstans vezérlőfrekvenciánál egy sec alatt megtesz,
- Terhelőnyomaték ( $M_t$ ; Nm): a rotoron ható összes külső statikus nyomaték,
- Rotor tehetetlenségi nyomaték ( $J_R$ ; kgcm<sup>2</sup>): csak a rotor tehetetlenségi nyomatéka,
- Redukált tehetetlenségi nyomaték ( $J_L$ ; kgcm<sup>2</sup>): az összes külső, a rotor tengelyére redukált, tehetetlenségi nyomaték,
- Veszteségi nyomaték ( $M_s$ ; Ncm): az a maximális nyomaték, amellyel egy gerjesztetlen motor statikusan terhelhető anélkül, hogy folyamatos mozgást előidéznék,

- Rögzítő nyomaték ( $M_H$ ; Nm): az a minimális nyomaték, amellyel egy gerjesztett motort statikusan terhelhetünk, anélkül, hogy folyamatos forgást előidéznénk,
- Statikus terhelési szög ( $\beta^\circ$ ): az a szög, amellyel nulla vezérlőfrekvenciánál a rotor előre megadott statikus terhelés hatására a terheletlen állapothoz képest elfordul,
- START tartomány: az az üzemtartomány, amelyben a motor meghatározott tehetetlenségi nyomatéknál konstans vezérlőfrekvenciával lépéshiba nélkül indul és megáll,
- Gyorsulástartomány: az az üzemtartomány, amelyben a motor meghatározott tehetetlenségi nyomatéknál és előre megadott vezérlőfrekvenciánál lépéshiba nélkül gyorsulásra üzemel, ugyanis nem tud indulni és megállni,
- START határnyomaték ( $M_{Am}$ ; Nm): az a maximális terhelőnyomaték, amellyel a motor a frekvenciától és egy meghatározott tehetetlenségi nyomatéktól függően lépéshiba nélkül indulni tud,
- START-határfrekvencia ( $f_{Am}$ ; Hz): az a maximális frekvencia, amellyel a motor a terhelőnyomatéktól függően lépéshiba nélkül indulni tud,
- Maximális START-frekvencia ( $f_{Aom}$ ; Hz): az a maximális vezérlőfrekvencia, amelynél a terheletlen motor lépéshiba nélkül indulni és megállni tud,
- Határtehetetlenségi nyomaték START tartományban ( $J_{Lm}$ ; kgcm<sup>2</sup>): a legnagyobb tehetetlenségi nyomaték amelynél a motor terhelőnyomaték nélkül egy megadott vezérlőfrekvenciánál lépéshiba nélkül indulni és megállni tud,
- Üzemi határnyomaték ( $M_{Bm}$ ; Nm): a legnagyobb terhelőnyomaték, amellyel a motor meghatározott terhelőnyomatéknál és előre megadott vezérlőfrekvenciánál üzemelni tud,
- Üzemi határfrekvencia ( $f_{Bm}$ ; Hz): a legnagyobb vezérlő frekvencia, amelyiknél a motor egy meghatározott terheléssel lépéshiba nélkül üzemelni tud,
- Maximális üzemi frekvencia ( $f_{Bom}$ ; Hz): az a legnagyobb vezérlőfrekvencia, amelyiknél a terheletlen motor lépéshiba nélkül üzemelni tud.
- Maximális nyomaték ( $M_m$ ; Nm): a maximális üzemi határnyomaték.

A léptetőmotorok karakterisztikáját a 4.72. ábra mutatja. A karakterisztikák két egymástól jól elkülöníthető tartományt alkotnak. Az árnyékolt területen lévő jelleggörbék által meghatározott adatokkal a léptetőmotor START-tartományban üzemeltethető. Az  $M_B$  jelleggörbe adataival a lépte-

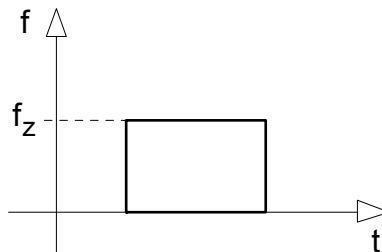
tőmotor határterhelési üzemben működtethető, ilyenkor a lépéshiba elkerülésére szabályozott gerjesztő frekvencia felfutást kell alkalmazni.



4.73. ábra

A léptetőmotorok üzemeltetése során az alábbi üzemmódokat alkalmazhatjuk;

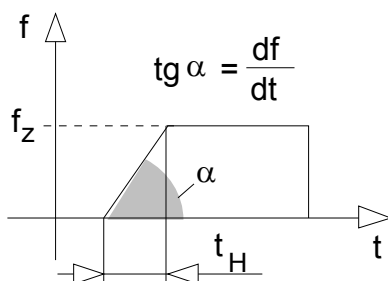
- START-STOP üzem (4.74.) ábra. Ez az üzemmód akkor alkalmazható, ha 1000 Hz alatti lépésfrekvenciánál viszonylag csekélyek a gyorsítandó tehetetlenségi nyomatékok



4.74. ábra

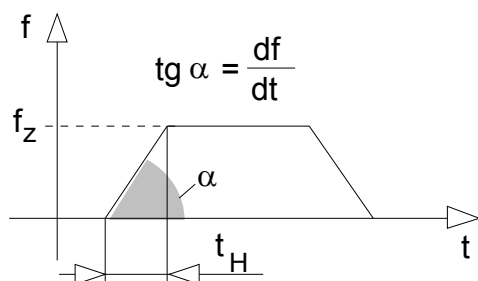
- Egyenletes frekvenciafelfutás (4.75. ábra). Ezt az üzemmódot akkor alkalmazzuk, ha a terhelőnyomaték nagyobb, mint a motor-nyomaték

50%-a. A tehetetlenségi nyomaték gyorsításánál egyenletes frekvencia növekedés látható.



4.75. ábra

- Egyenletes frekvencia felfutás és lefutás (4.76. ábra). Viszonylagosan nagy tehetetlenségi nyomatékok gyorsításakor, vagy olyan esetben alkalmazzuk ezt az üzemmódot, amikor az üzemi frekvencia magasabb mint a maximális startfrekvencia.



4.76. ábra

A léptetőmotoros hajtás nyomatékszükséglete:

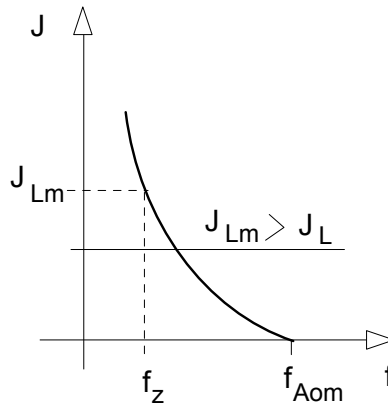
$$M = M_L + M_{gy}, \quad (4.87)$$

ahol  $M_L$  a terhelőnyomaték,

$$M_{gy} = \frac{2\pi}{z} (J_R + J_L) \frac{df}{dt}. \quad (4.88)$$

(4.88)-ban  $J_L$  a redukált tehetetlenségi nyomatékot,  $J_R$  a forgórész tehetetlenségi nyomatékot  $z$  pedig a lépésszámot jelenti. Ha a léptetőmotoros hajtás a

START-STOP üzemben dolgozik  $M_{gy}$  gyorsító nyomatékot szükségtelen figyelembe venni. A motortáblázatból azt a motort választjuk ki, amelynek a határtehetetlenségi nyomatéka – 4.77. ábra alapján –  $f_z$  frekvenciánál nagyobb, mint a  $J_L$  terhelő tehetetlenségi nyomaték.



4.77. ábra

A terhelő nyomaték ez esetben

$$M_L = M_{Bm} \frac{J_{Lm} - J_L}{J_{Lm} + J_R} \quad (4.89)$$

összefüggéssel számítható.

Egyenletes frekvencia felfutás és lefutás esetén a gyorsító nyomaték nem hanyagolható el, ekkor a terhelő nyomaték

$$M_L = M_{Bm} - \frac{J_L + J_R}{\frac{10^6 t_H}{f_z} + \frac{J_{Lm} + J_R}{M_{Bm}}} \quad (4.90)$$

egyenlet segítségével határozható meg.

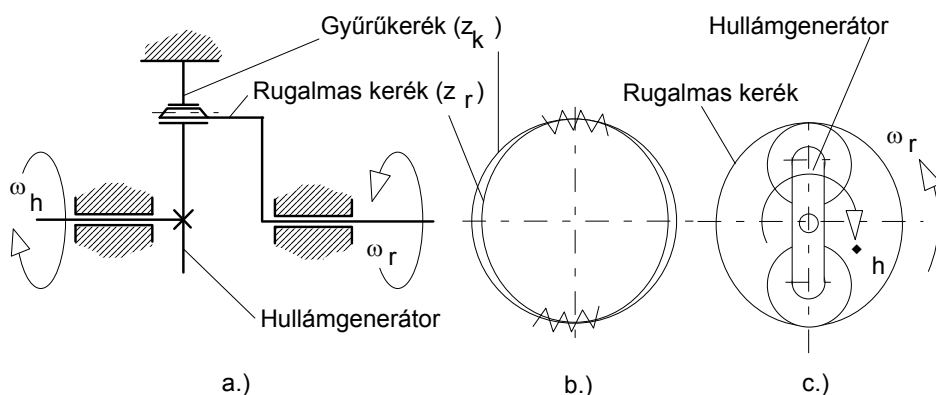


### c) Hajtóművek, mozgás átalakítók, hajtóegységek (blokkok)

A hajtóművek feladata a villamos motorok nagy fordulatszámát a robotkarok kis fordulatszámává átranzformálni. E célra a klasszikus ipari hajtóművek méreteik és önsúlyuk miatt nem alkalmasak. A holdjárművek fejlesztése során vetődött fel az az igény, hogy kis befoglaló méretben nagy áttételű (nagy nyomatékot előállító) hajtóművet hozzanak létre. E fejlesztés eredményeként előállított hajtóművet hullámhajtóműnek (harmonikus hajtóműnek) nevezték el.

A hullámhajtómű felépítését a 4.78. ábra mutatja. A hajtómű alapelemei:

- rugalmas kerék (hullámkerék)
- gyűrűkerék,
- hullámgenerátor.



4.78. ábra

A hullámhajtóművekre is érvényesek a merev tagokból álló bolygó-művekre leszármaztatott kinematikai összefüggések;

$$\frac{\omega_r - \omega_h}{\omega_k - \omega_h} = \frac{z_k}{z_r}, \quad (4.91)$$

ahol  $\omega_r$  a rugalmas kerék,  $\omega_h$  a hullámgenerátor,  $\omega_k$  a gyűrűkerék szögsebessége, illetve  $z_k$  a gyűrűkerék,  $z_r$  pedig a rugalmas kerék fogszáma. Ha a gyűrűkereket rögzítjük  $\omega_k = 0$ , akkor (4.91)

$$\frac{\omega_r}{\omega_h} = \frac{z_r - z_k}{z_r} \quad (4.92)$$

alakra módosul, amelyben

$$i_{h-r}^{(k)} = \frac{\omega_h}{\omega_r} \quad (4.93)$$

a hajtómű áttételét jelenti ( $i_{h-r}^{(k)} > 1$ ). (4.92)-ből  $z_k = 202$ ,  $z_r = 200$  esetén

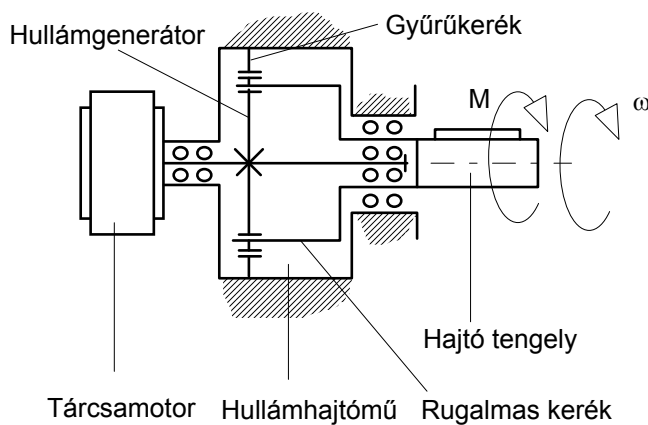
$$i_{h-r}^{(k)} = \frac{200}{200 - 202} = -100$$

adódik, amely mint egy fogaskerékpárral megvalósítható áttétel nagyon nagy. A negatív előjel  $\omega_r$  és  $\omega_h$  ellentétes irányára utal.

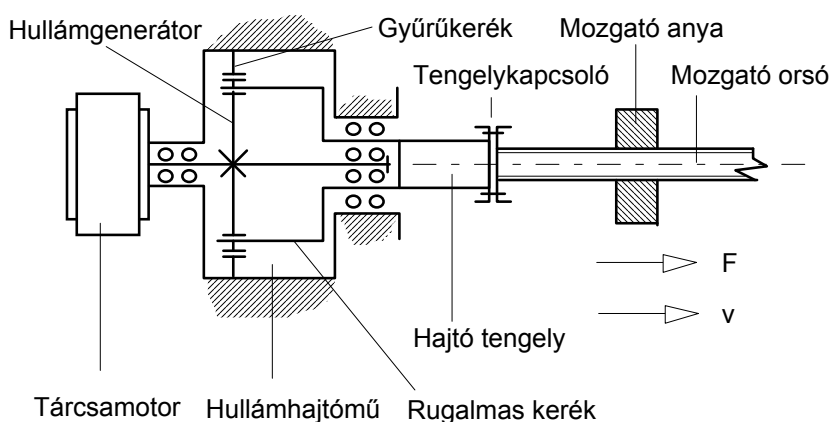
A 4.78. ábrán lévő hajtóművet a 4.65. ábra szerinti tárcsamotorral összekapcsolva a 4.79. ábra hajtó egységéhez jutunk. A 4.79. ábra forgó mozgása mozgató orsó és anya segítségével lineáris mozgássá is átalakítható (4.80. ábra). A lineáris mozgítás sebessége a rugalmas kerék szögsebességéből

$$v_m = \frac{h}{2\pi} \omega_r \quad (4.94)$$

alapján határozható meg, ahol  $h$  a mozgató orsó menetemelkedése.

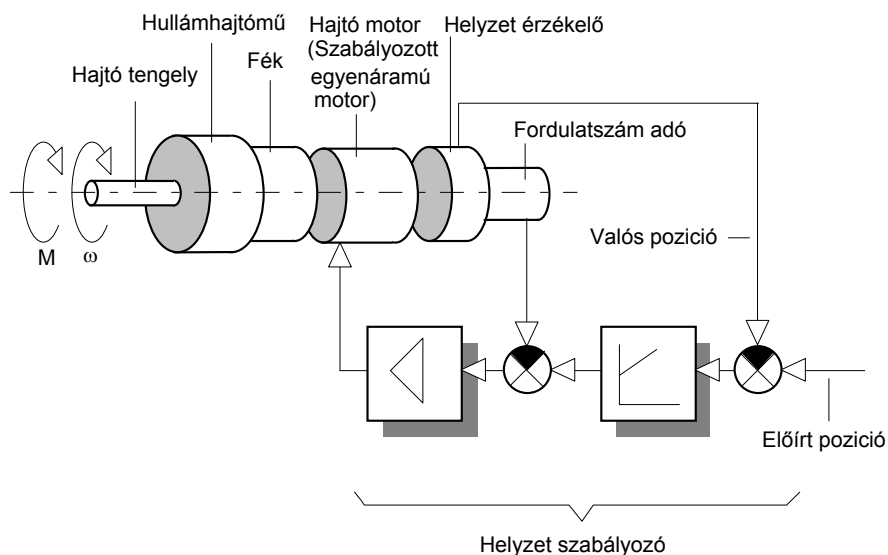


4.79. ábra



4.80. ábra

A 4.79. és a 4.80. ábra szerinti robot hajtásokat, szabályozott egyenáramú motorok alkalmazása esetén még ki kell egészíteni szögelfordulás és fordulatszám mérő szenzorokkal, illetve szabályozó egységekkel. A hullámhajtóművet, a szervomotort, a fordulatszámadót és a szögadót egy szerkezeti egységként alakítják ki. Egy ilyen egységet mutat a 4.81. ábra.



4.81. ábra

A 4.79. és 4.80. ábrákon bemutatott robot hajtásokban a szabályozott egyenáramú motor helyett léptetőmotor is alkalmazható. A hullám-

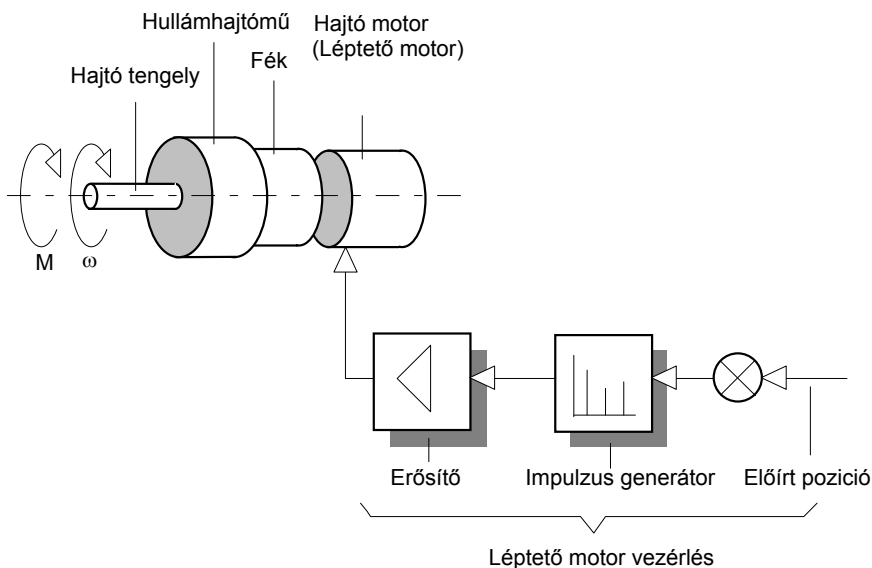
hajtóművek nagy áttételét és a 4.4.3.b. fejezetpontban leírtakat figyelembe véve a hajtás lépésszöge

$$\Theta_h = \frac{360^\circ}{z} \left| \frac{1}{i_{h-r}^{(k)}} \right| \quad (4.95)$$

vagy elemi elmozdulása (útinkrementje) pedig

$$s_h = \frac{1}{z} \left| \frac{1}{i_{h-r}^{(k)}} \right| h. \quad (4.96)$$

(4.95) és (4.96) összefüggésekből látható, hogy a hajtás által megvalósítandó szögelfordulás vagy elmozdulás az elemi szögelfordulások vagy az elemi elmozdulások sokszorozásával realizálható. Ez a sokszorozás pedig meghatározott számú léptető impulzus előállításával hajtható végre. A megtett szögelfordulás/elmozdulás mérése tehát gerjesztő impulzus számlálásra vezethető vissza. Ennek következtében a léptetőmotoros hajtások nem tartalmaznak útmérő rendszereket. A hajtórendszer felépítése a 4.82. ábrán látható.



4.82. ábra

### 4.5. Robotok megfogó szerkezetei

A robotok megfogó szerkezeteik által kapcsolódnak az általuk kiszolgált technológiai folyamatokhoz, akár anyagkezelési, akár technológiai műveletet végeznek. A technológiai folyamatok, - és bennük a robotok által végzett műveletek - sokfélesége konstrukciójában és megfogási elveiben egymástól eltérő megfogó szerkezetet igényel. Mivel a robotok az emberi kar munkavégző képességét és mozgásait igyekeznek kiváltani, a munka tárgyával kapcsolatba kerülő megfogó szerkezetként is az emberi kéz mozgásait leképező szerkezet lenne a legideálisabb. Ennek általános felhasználású megvalósítása azonban pillanatnyilag nem időszerű és technikailag is nehezen kivitelezhető.

Tárgyaknak az emberi kézzel való megfogási alapeseteit a 4.83. ábra mutatja. Az ábrán lévő megfogási elveket tekintve azt tapasztaljuk, hogy a



4.83. ábra

hengeres, a csatszerű (behajlított ujj) és a gömbszerű megfogás esetén a kéz ujjai felveszik a megfogott tárgy alakját, azt szinte körbe zárják. Az újhegygyel, a rúdvég és az oldalon való megfogás esetén pedig a tárgyat két ujj által kifejtett szorítóerővel fogjuk meg.

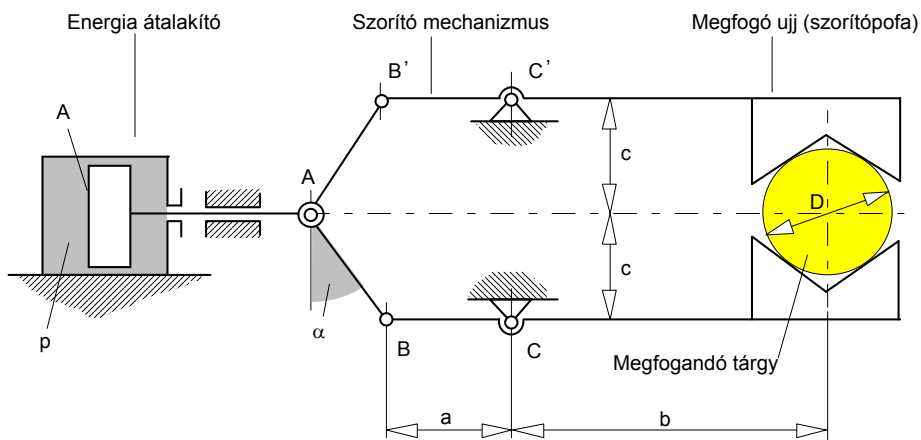
A fenti megállapítás a robot megfogó szerkezetekre általánosítható, miszerint a tárgyak megfogása vagy alakzáró vagy pedig erőzáró kapcsolattal realizálható. Az alakzáráson és az erőzáráson alapuló megfogási elvek

- mechanikus ujjak (szorítópofák),
- speciális készülékek (szerszámok),
- univerzális ujjak

segítségével valósíthatók meg. A megfogó szerkezet azonban konstrukciójában és a tárgyakhoz való megfogási adaptációs készségében jelentősen eltér a 4.83. ábrán lévő emberi kéztől, működése során annak csak a megfogási elveit közelíti meg. Számos próbálkozás történt a (megfogó-szerkezetek) adaptációs készségének növelésére, de ezek nem jártak sem gazdasági, sem pedig funkcionális előnyökkel.

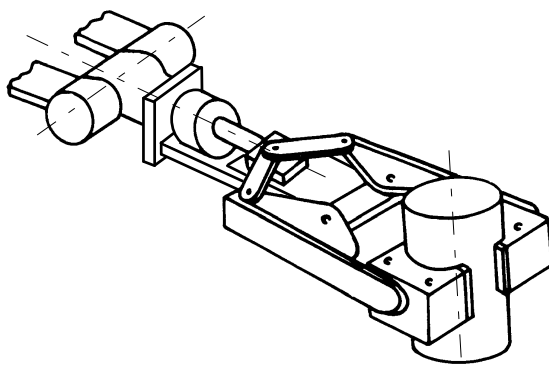
A továbbiakban a két mechanikus ujjal ellátott ún. szorítópofás megfogó szerkezet felépítését és jellegzetes megfogási eseteit vizsgáljuk meg. A megfogó szerkezet elvi felépítése a 4.84. ábrán látható. A megfogás a mozgató anyagok, munkadarabok és a szorítópofák megfogó felületei között létrejövő erőzáró- vagy alakzáró kapcsolattal történik. A megfogó szerkezet fő részei:

- szorítómechanizmus,
- működtető szerkezet (energiaátalakító),
- ujjak (szorítópofák),
- állvány (váz) szerkezet.



4.84. ábra

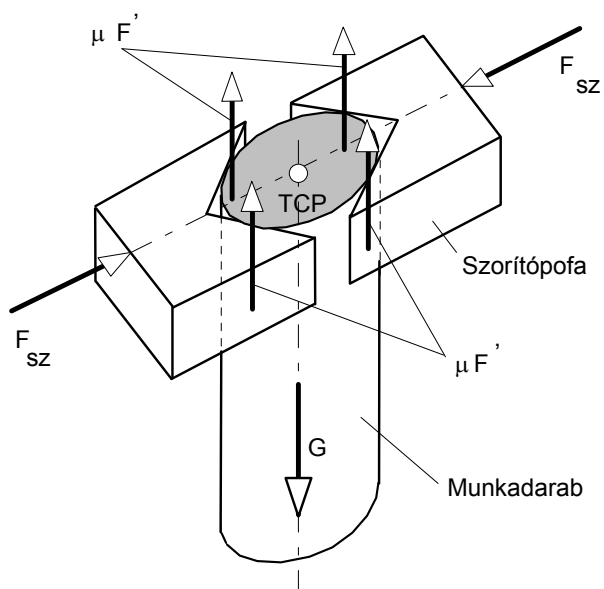
Kétujjas megfogók szorítómechanizmusának szerkezeti kialakítását a 4.85. ábra mutatja. Mindkét ábrából látható, hogy a szorítómechanizmus szimmetrikus felépítésű, és a működtető szerkezet is szimmetrikus működést biztosít.



4.85. ábra

#### 4.5.1. Erőzáró megfogás

Erőzáró megfogásról akkor beszélhetünk, ha a megfogandó tárgy súlyerő vektora merőleges a megfogó ujjak szorító erejét létrehozó ujj-mozgás síkjára. Az erőzáró megfogás elve a 4.86. ábrán értelmezhető.



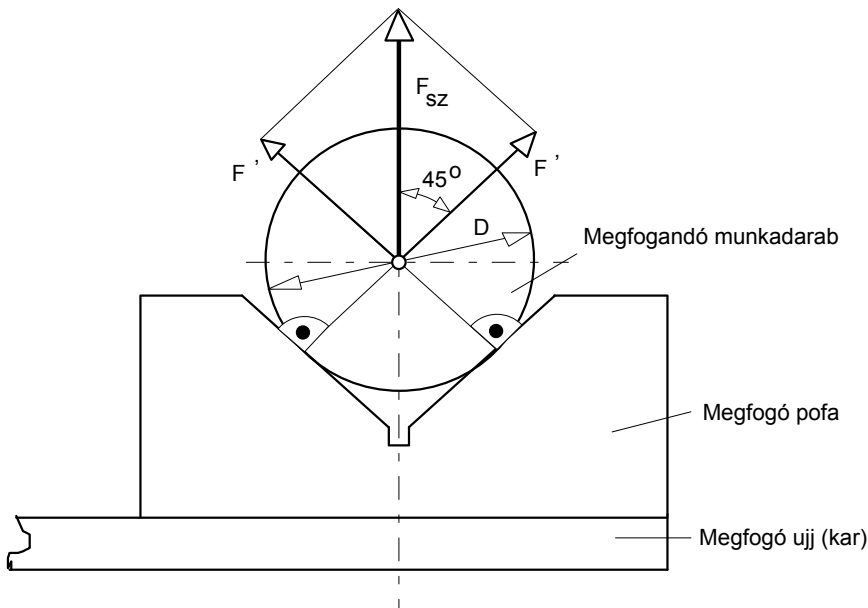
4.86. ábra

A megfogó ujj szorítófelülete prizmatikus kialakítású, amelyet szorítópofának is neveznek.

A munkadarab (tárgy) megfogásának feltétele:

$$G = mg \leq 4\mu F', \quad (4.97)$$

ahol  $m$  a megfogandó tárgy tömege,  $\mu$  a szorítópofa és a tárgy közötti súrlódási tényező,  $F'$  pedig a 4.85. ábra alapján határozható meg az



4.87. ábra

$$F' = F_{sz} \cos 45^\circ \quad (4.98)$$

összefüggéssel. (4.98)-at (4.97)-be helyettesítve a megfogás feltétele a szorítóerővel is értelmezhető az

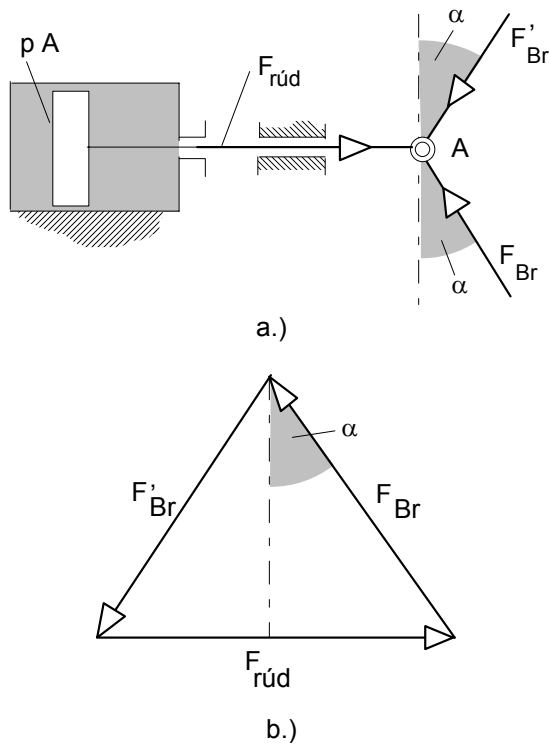
$$G = mg \leq 4\mu F_{sz} \cdot \cos 45^\circ, \quad (4.99)$$

illetve az

$$F_{sz} \geq \frac{mg}{4\mu \cos 45^\circ} \quad (4.100)$$







4.90. ábra

$$F_{\text{rúd}} = 2 F_{\text{Br}} \sin \alpha \quad (4.102)$$

összefüggéssel, a szorításhoz szükséges dugattyútérbeli nyomás pedig

$$p = \frac{F_{\text{rúd}}}{A} \quad (4.103)$$

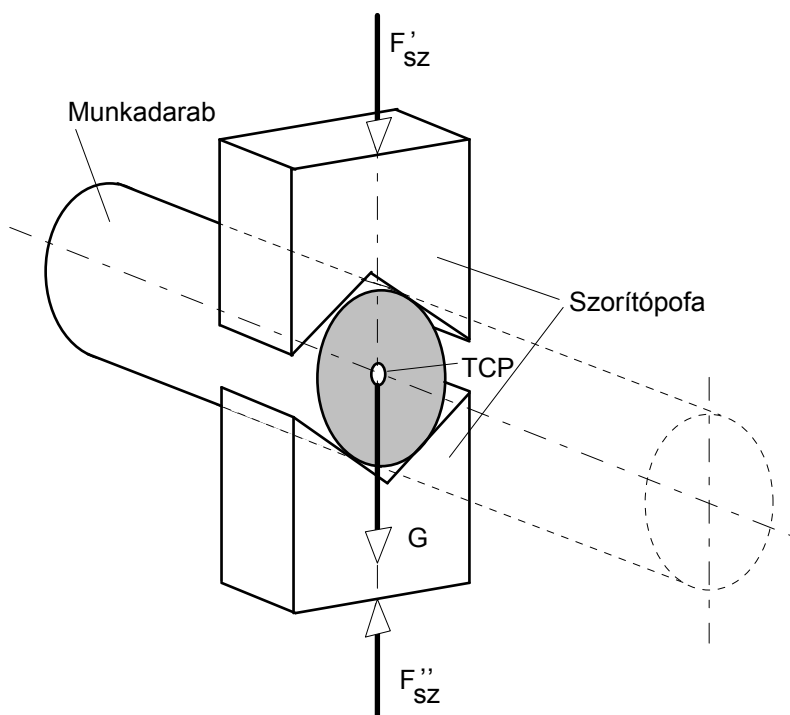
alapján számítható. (4.100), (4.101), (4.102) és (4.103) felhasználásával a megfogás feltétele az energia átalakító pneumatikus henger nyomására is értelmezhető

$$p \geq \frac{b \operatorname{tg} \alpha}{2 A \mu a \cos 45^{\circ}} m g \quad (4.104)$$

alakban.

### 4.5.2. Alakzáró megfogás

Alakzáró megfogás esetén a megfogandó tárgy súlyerejéből adódó terhelést a megfogó ujjak egyenlítik ki, mintegy körbefogva a tárgyat. Két-ujjú megfogó esetén ez azt jelenti, hogy a megfogandó tárgy súlyerő vektora a megfogó ujjak megfogó erejét létrehozó mozgás síkjában helyezkedik el. A megfogás elvét ez esetben a 4.89. ábra mutatja. A szorítómechanizmus terhelése ilyen esetben



4.91. ábra

a szorítás (megfogás) síkjában aszimmetrikussá válik (4.92. ábra).

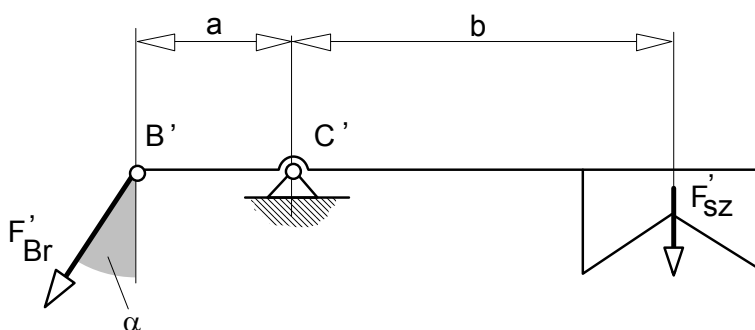


$$F''_{Br} = \frac{b}{a \cos \alpha} (G + F'_{sz}) \quad (4.107)$$

összefüggést kapjuk. A B'C' rúd egyensúlya pedig, az

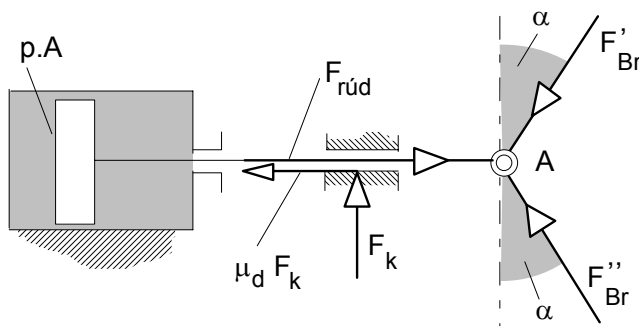
$$F'_{Br} = \frac{b}{a \cos \alpha} F'_{sz} \quad (4.108)$$

egyenlettel írható le (4.94. ábra). (4.107) és (4.108) ismeretében

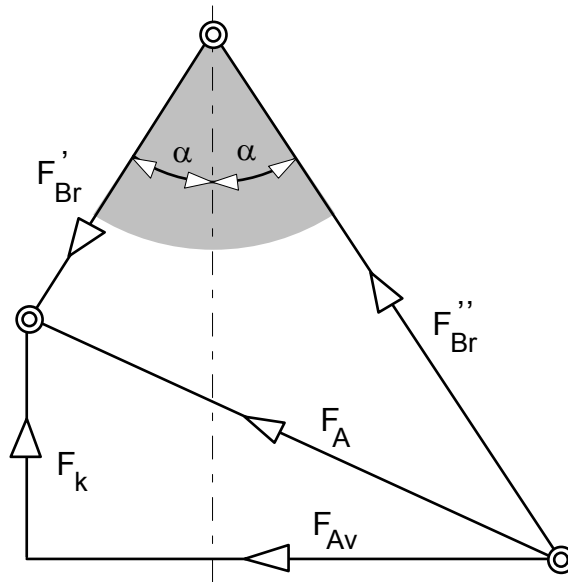


4.94. ábra

vizsgálható az A csukló egyensúlya is a 4.95. ábra alapján. Mivel  $F''_{Br} > F'_{Br}$  fellép egy, a dugattyúrúdra merőlegesen ható erő. Az A csukló egyensúlyi erőrendszerét a 4.96. ábra mutatja, amelyből a dugattyúrúdra



4.95. ábra



4.96. ábra

ható erők

$$F_k = (F''_{Br} - F'_{Br}) \cos \alpha \quad (4.109)$$

és

$$F_{Av} = (F''_{Br} + F'_{Br}) \sin \alpha . \quad (4.110)$$

(4.107) és (4.108) felhasználásával (4.109) és (4.110) egyenletek

$$F_k = \frac{b}{a} G, \quad (4.111)$$

$$F_{Av} = \frac{b}{a} (G + 2F'_{sz}) \operatorname{tg} \alpha \quad (4.112)$$

alakra hozhatók. A megfogást biztosító pneumatikus henger által kifejtendő nyomóerő

$$pA \geq F_{Av} + \mu_d F_k \quad (4.113)$$

egyenletből határozható meg, ahol  $\mu_d$  a dugattyúrúdon az  $F_k$  erő hatására létrejövő megvezetési súrlódás tényezője. (4.111) és (4.112) összefüggések (4.113)-ba helyettesítésével

$$p A \geq \left[ \frac{\operatorname{tg} \alpha + \mu_d}{\operatorname{tg} \alpha} G + 2 F'_{sz} \right] \frac{a}{b} \operatorname{tg} \alpha \quad (4.114)$$

egyenlet adódik, amely (4.105) felhasználásával alkalmas arra, hogy adott  $p$  nyomás esetén meghatározzuk az alakzárást biztosító szorítóerőket;

$$F'_{sz} = \frac{p A \frac{a}{b} - (\operatorname{tg} \alpha + \mu_d) G}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (4.115)$$

$$F''_{sz} = \frac{p A \frac{a}{b} + (\operatorname{tg} \alpha - \mu_d) G}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.116)$$

A megfogási elvet bemutató 4.91.- és 4.92. ábrákból könnyen belátható, hogy  $F'_{sz} \geq 0$  feltételnek teljesülni kell. Ellenkező esetben megfogó szerkezet a megfogandó tárgy súlyerejének hatására szétnyílik, és nem biztosítja az alakzárással való megfogást. Tehát az alakzárással való megfogás feltétele

$$F'_{sz} \geq 0 \quad (4.117)$$

vagy (4.115) felhasználásával

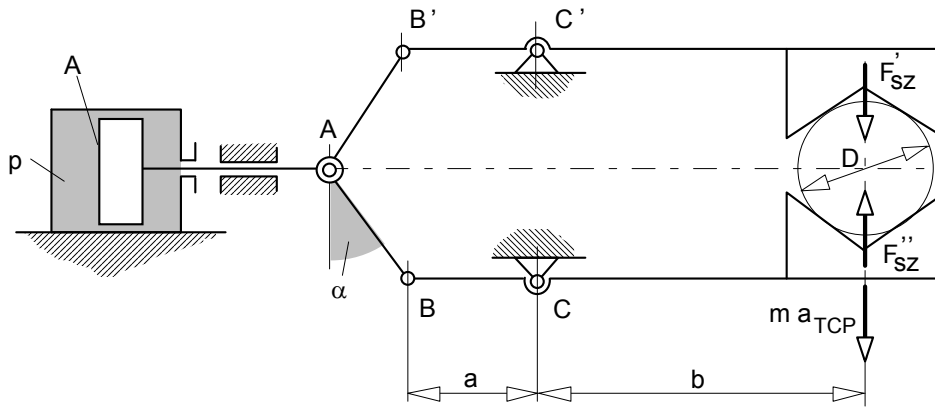
$$p \geq \frac{(\operatorname{tg} \alpha + \mu_d) b G}{a A}. \quad (4.118)$$

### 4.5.3. Robotmozgás dinamikai jelenségei és a megfogó szerkezet megfogási biztonsága

A 4.5.1. és 4.5.2. fejezetpontokban a megfogás statikus eseteit tárgyaltuk. A robotmozgás instacionárius fázisaiban azonban a megfogandó tárgyra olyan járulékos erők hatnak, amelyek a megfogás statikus egyensúlyi állapo-

tát megváltoztatják. A statikus egyensúlyi állapot megváltozása megváltoztatja a megfogó szerkezet megfogási biztonságát.

Elsőként a 4.97. ábrán vázolt esetet nézzük meg, amikor a megfogandó tárgyra a megfogó síkjában a robot indulási és megállási fázisában tömegelő hat. A megfogás erőzáró kapcsolattal jön létre, amelyet a 4.98. ábra



4.97. ábra

szemléltet. Ha az ábrát összehasonlítjuk a 4.88. ábrával látható, hogy a megfogó szerkezet belső erőrendszere átrendeződött.

A megfogandó tárgyra a megfogó síkjában ható erőrendszer

$$F_{SZ}'' = m a_{TCP} + F_{SZ}', \quad (4.119)$$

ahol az  $a_{TCP}$  a robot TCP pontjának gyorsulása a megfogó síkjában. A 4.85. ábra és (4.94) összefüggés értelemszerű alkalmazásával az erőzáró megfogás feltétele ez esetben

$$G = mg \leq 2 \mu (F_{SZ}' + F_{SZ}'') \cos 45^\circ. \quad (4.120)$$

A levezetések mellőzésével,  $F_{SZ}'$  és  $F_{SZ}''$  formailag (4.115) és (4.117) összefüggések segítségével határozható meg, ha  $G$  helyére  $m a_{TCP}$  értéket helyettesítünk, így

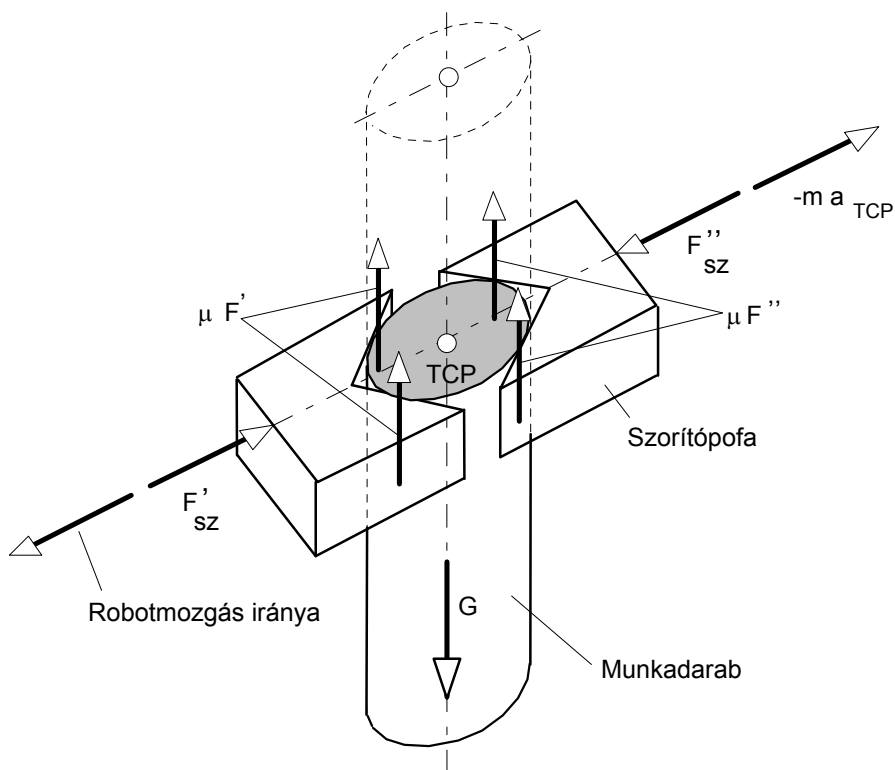


$$F'_{sz} = \frac{p A \frac{a}{b} - (\operatorname{tg} \alpha + \mu_d) m a_{TCP}}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (4.121)$$

$$F''_{sz} = \frac{p A \frac{a}{b} + (\operatorname{tg} \alpha - \mu_d) m a_{TCP}}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4.122)$$

(4.121) és (4.122) egyenletek (4.120)-ba helyettesítésével a megfogás feltételét a működtető pneumatikus henger nyomására is értelmezhetjük;

$$p \geq \frac{mg}{2 \mu A a \cos 45^\circ} b \operatorname{tg} \alpha + \frac{\mu_d m a_{TCP}}{A a} b \quad (4.123)$$



4.98. ábra

(4.123) összefüggés (4.104)-gyel való összehasonlításból megállapítható, hogy a két megfogási feltétel egymástól eltér, az eltérés mértéke arányos a tömegeerővel.

Másodikként a 4.99. ábrán lévő megfogási esetet vizsgáljuk meg. Ez a megfogási mód a robot nyugalmi állapotában alakzáró kapcsolattal való megfogás. Ha a robot mozgása a megfogó síkjába merőleges, a megfogás feltételeként az alakzáró kapcsolat mellett - a tömegeerő kiegyenlítésére - egy erőzáró megfogási feltételt is elő kell írni. A 4.99. ábra jelöléseit felhasználva ez a feltétel

$$ma_{TCP} \leq 2 \mu (F' + F'') \quad (4.124)$$

alakban írható fel, amely a 4.87. ábra és (4.98) alapján átirható

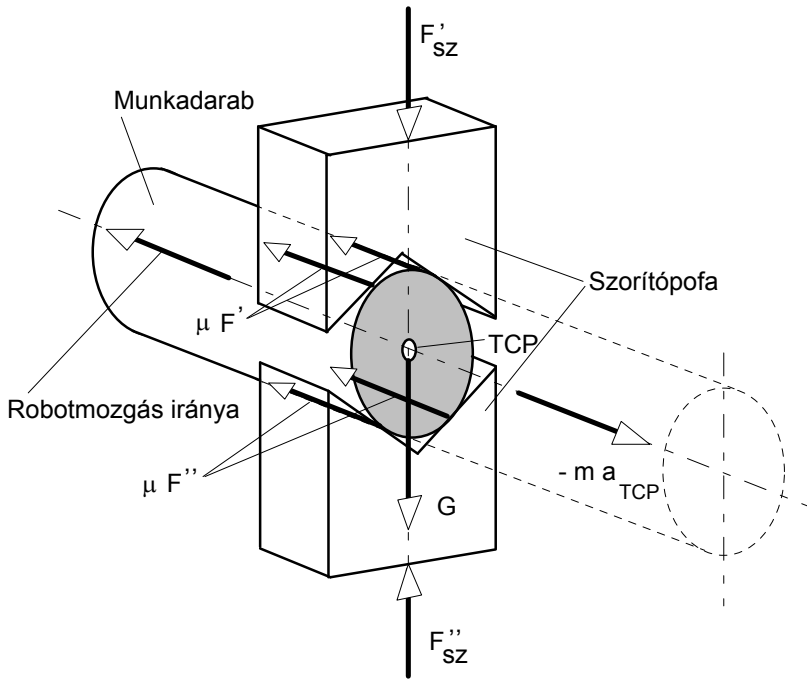
$$ma_{TCP} \leq 2 \mu (F'_{sz} + F''_{sz}) \cos 45^\circ \quad (4.125)$$

összefüggéssé. (4.115) és (4.116) kifejezések (4.125)-be való helyettesítésével a megfogási feltétel itt is értelmezhető a működtető henger nyomására, amely szerint

$$p \geq \frac{\mu_d G}{A a} b + \frac{ma_{TCP}}{2 \mu A a \cos 45^\circ} b \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.126)$$

Amennyiben a robot mozgása során (4.123) és (4.126) alatti feltételek nem teljesülnek, csak a statikus állapotra érvényes (4.104) és (4.118) egyenlőtlenségek elégülnek ki, a megfogás biztonsága csökken. Előfordulhat olyan eset, hogy a mozgatott munkadarab a megfogóból kiesik, ami baleseti forrás.

A robot mozgása során a fenti speciális eseteken kívül általános megfogóhelyzetek is előfordulnak. A 4.100. ábra ilyen esetet mutat. Az ábrán bemutatott esetben mind a súlyerő, mind a mozgás instacionárius szakaszában fellépő tömegeerő miatt egyszerre kell biztosítani a munka-darab erőzáró és alakzáró megfogásának feltételét.



4.99. ábra

A 4.100. ábrán lévő súlyerőt és a tömegerőt bontsuk komponensekre, és értelemszerűen használjuk fel a (4.120), (4.121) és (4.122) illetve a (4.115), (4.117) és (4.125) egyenleteket, amelyek ez esetben az erőkomponensekre vonatkozó megfogási feltételeket jelentik. A levezetések részletes kifejtése nélkül (4.120), (4.121), (4.122) feltételekre

$$p_e \geq \frac{G \cos \gamma}{2 \mu A a \cos 45^\circ} b \operatorname{tg} \alpha + \frac{\mu_d m a_{TCP} \cos \gamma}{A a} b, \quad (4.127)$$

(4.115), (4.117), (4.125) feltételekre pedig,

$$p_a \geq \frac{\mu_d G \sin \gamma}{A a} b + \frac{m a_{TCP} \sin \gamma}{2 \mu A a \cos 45^\circ} b \operatorname{tg} \alpha \quad (4.128)$$



Adatok:

$$a = 50 \text{ [mm]},$$

$$b = 200 \text{ [mm]},$$

$$\alpha = 30^\circ,$$

$$m = 7 \text{ [kg]},$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]},$$

$$a_{\text{TCP}} = 1,5 \text{ [m/s}^2\text{]},$$

$$\mu = 0,25,$$

$$\mu_d = 0,2,$$

$$D_h = 50 \text{ [mm]}.$$

a) Erőzáró megfogás statikus esetben (4.104) szerint;

$$p \geq \frac{b \operatorname{tg} \alpha}{2 A \mu a \cos 45^\circ} mg = \frac{0,2 \cdot \operatorname{tg} 30^\circ}{2 \cdot 0,025^2 \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 0,05 \cos 45^\circ} 7 \cdot 9,81 =$$

$$= \frac{0,2 \cdot 0,577}{2 \cdot 6,25 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot 0,25 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,707} 7 \cdot 9,81 = 228,34 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right].$$

b) Alakzáró megfogás statikus esetben (4.118) alapján;

$$p \geq \frac{(\operatorname{tg} \alpha + \mu_d) b G}{A a} = \frac{(\operatorname{tg} 30^\circ + 0,2) \cdot 0,2 \cdot 7 \cdot 9,81}{0,025^2 \pi \cdot 0,05} =$$

$$= \frac{(0,577 + 0,2) \cdot 0,2 \cdot 7 \cdot 9,81}{6,25 \cdot 10^{-4} \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 108,697 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right].$$

c) Erőzáró megfogás dinamikus esetben (4.123) szerint;

$$\begin{aligned}
 p &\geq \frac{mg}{2\mu A a \cos 45^\circ} b \operatorname{tg} \alpha + \frac{\mu_d m a_{\text{TCP}}}{A a} b = \\
 &= \frac{7 \cdot 9,81}{2 \cdot 0,25 \cdot 0,025^2 \pi \cdot 0,05 \cos 45^\circ} 0,2 \operatorname{tg} 30^\circ + \frac{0,2 \cdot 7 \cdot 1,5}{0,025^2 \pi \cdot 0,05} 0,2 = \\
 &= \frac{7 \cdot 9,81 \cdot 0,2 \cdot 0,577}{2 \cdot 0,25 \cdot 6,25 \cdot 10^{-4} \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,707} + \frac{0,2 \cdot 7 \cdot 1,5}{6,25 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} 0,2 = \\
 &= 228,34 \cdot 10^3 + 4,278 \cdot 10^3 = 232,618 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right].
 \end{aligned}$$

d) Alakzáró megfogás dinamikus esetben (4.126) összefüggéssel;

$$\begin{aligned}
 p &\geq \frac{\mu_d G}{A a} b + \frac{m a_{\text{PTP}}}{2\mu A a \cos 45^\circ} b \operatorname{tg} \alpha = \\
 &= \frac{0,2 \cdot 7 \cdot 9,81 \cdot 0,2}{0,025^2 \pi \cdot 0,05} + \frac{7 \cdot 1,5}{2 \cdot 0,25 \cdot 0,025^2 \pi \cdot 0,05 \cos 45^\circ} 0,2 \cdot \operatorname{tg} 30^\circ = \\
 &= \frac{0,2 \cdot 7 \cdot 9,81 \cdot 0,2}{6,25 \cdot 10^{-4} \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} + \frac{7 \cdot 1,5}{2 \cdot 0,25 \cdot 6,25 \cdot 10^{-4} \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,707} 0,2 \cdot 0,577 = \\
 &= 27,978 \cdot 10^3 + 34,914 \cdot 10^3 = 62,992 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right].
 \end{aligned}$$

e) Vegyes alakzáró és erőzáró megfogás dinamikus esetben, a megfogó helyzetét jellemző  $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}$  tartományban (4.126) összefüggés szerint;

A számítás eredményeit a 4.7. táblázatban foglaltuk össze. Az eredményekből látható, hogy az alakzáró megfogási helyzet felé való átmenet a biztonságos megfogáshoz kisebb nyomást igényel.

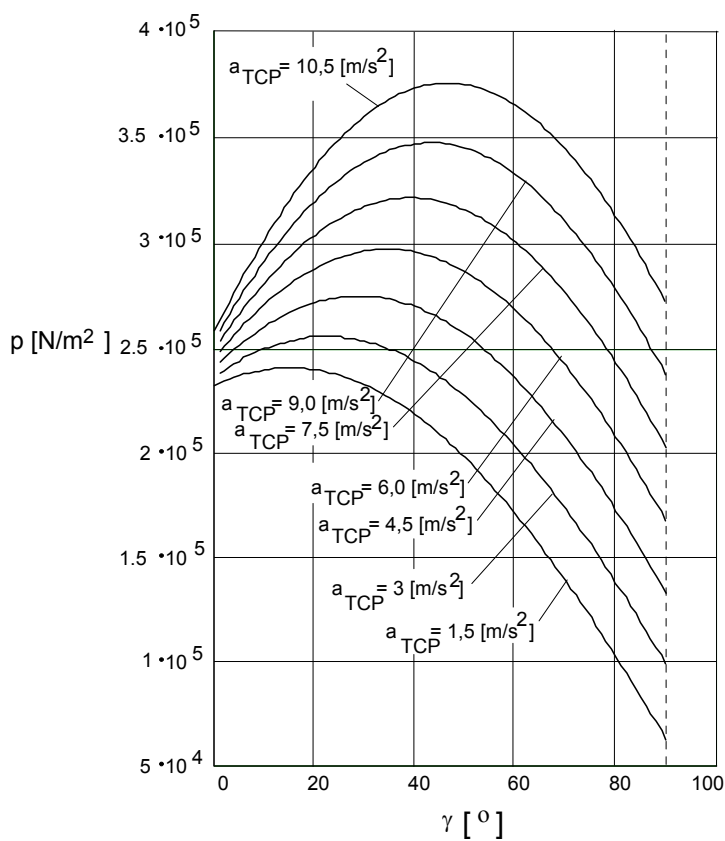
4.7. táblázat

$\gamma [^\circ]$	$a_{TCP} [m/s^2]$	$D_h [mm]$	$p [N/m^2]$
0	1,5	50	$2\,327 \cdot 10^5$
10	1,5	50	$2,401 \cdot 10^5$
20	1,5	50	$2,402 \cdot 10^5$
30	1,5	50	$2,330 \cdot 10^5$
40	1,5	50	$2,187 \cdot 10^5$
50	1,5	50	$1,978 \cdot 10^5$
60	1,5	50	$1,708 \cdot 10^5$
70	1,5	50	$1,387 \cdot 10^5$
80	1,5	50	$1,024 \cdot 10^5$
90	1,5	50	$0,629 \cdot 10^5$

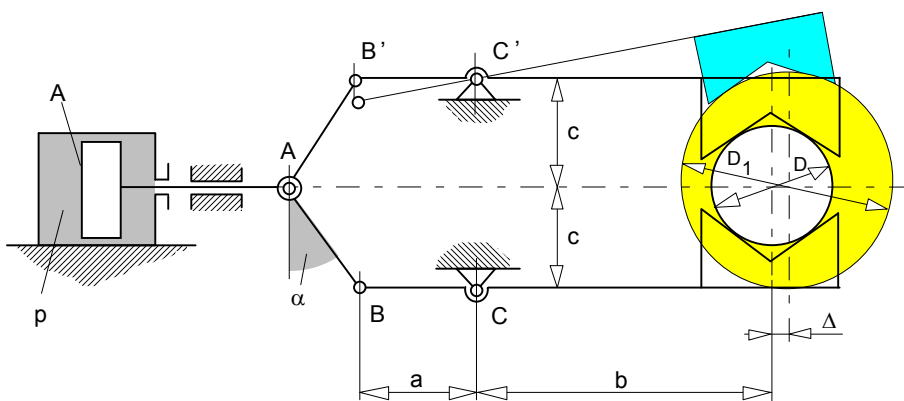
(4.129)-ben a megfogó konstrukciós kialakítását jellemző adatok egy adott megfogó szerkezet esetén állandóak. A robot mozgása során a pályagyorsulás ( $a_{TCP}$ ) változik. A 4.101. ábrán a különböző pályagyorsulás és megfogó szöghelyzet értékekhez tartozó nyomásértékeket tüntettük fel. Megállapítható, hogy nagy pályagyorsulások jelentősen megnövelik a biztonságos megfogáshoz szükséges szorítónyomást. Az ábrából az is megállapítható, hogy a megfogás biztonsága szempontjából a vegyes megfogási helyzetek a veszélyesek.

#### 4.5.4. A megfogandó munkadarabok méretének hatása a megfogó szerszámközéppontjának helyzetére

A kétujjas megfogó szerkezet alkalmas egymástól nem nagymértékben eltérő átmérőjű munkadarabok megfogására, anélkül, hogy a megfogó pófkát kicserélnénk. Ennek viszont az a következménye, hogy a munkadarab keresztmetszetének középpontja (a megfogó TCP pontja) eltolódik a  $\Delta$  értékkel (4.102. ábra).



4.101. ábra



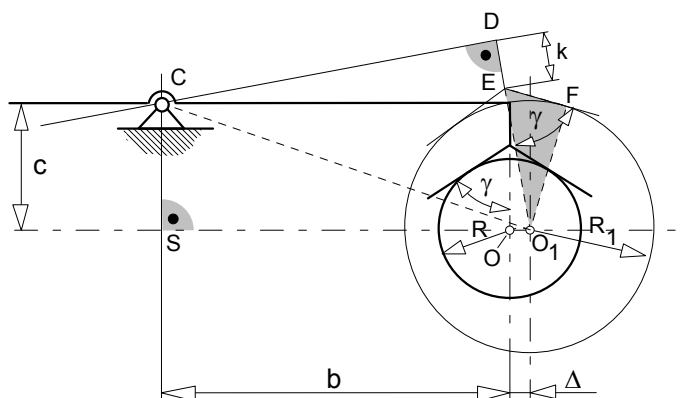
4.102. ábra



Az eltolódás mértékét a 4.103. ábra  $SO_1C$  és  $CO_1D$  illetve  $EO_1F$  derék-szögű háromszögei alapján határozhatjuk meg. A  $\overline{CO_1}$  szakasz hosszát az  $SO_1C$  és a  $CO_1D$  derékszögű háromszögekből kifejezve

$$(b + \Delta)^2 + c^2 = b^2 + \left(\frac{R_1}{\sin \gamma} + k\right)^2. \quad (4.130)$$

(4.130) egyenlet átalakításából kapott másodfokú egyenlet  $\Delta$ -ra megoldva

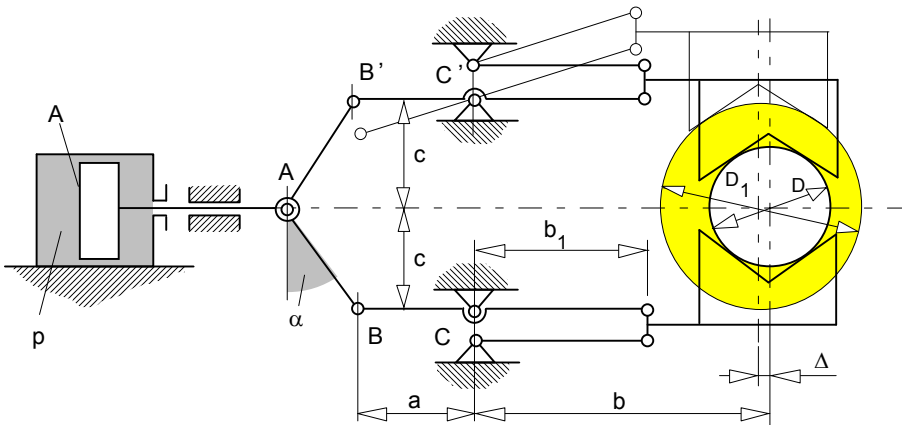


4.103. ábra

$$\Delta = -b + \sqrt{b^2 + \left(\frac{R_1}{\sin \gamma} + k\right)^2 - c^2} \quad (4.131)$$

összefüggéshez jutunk. Az eltolódás mértékét a robot pozíció meghatározásánál figyelembe kell venni.

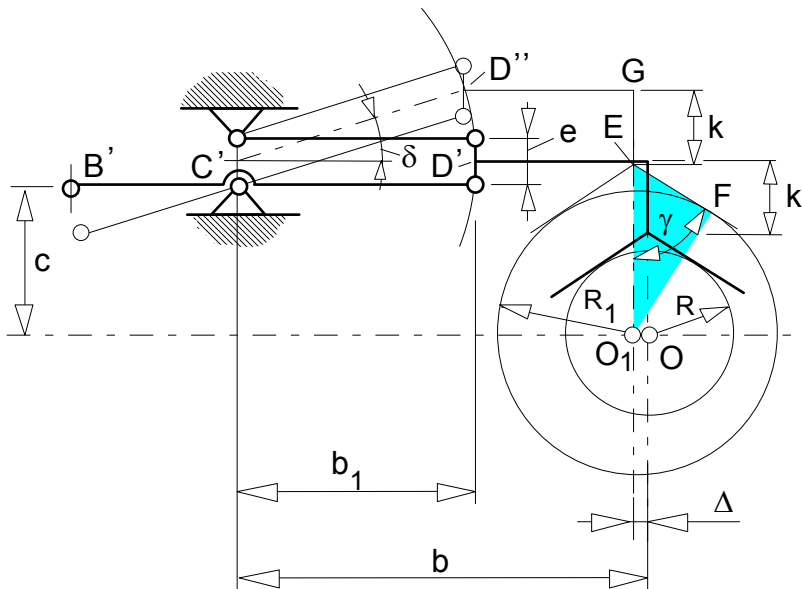
A továbbiakban azt vizsgáljuk meg, hogy a szerszámközéppont eltolódásának mértéke hogyan alakul a 4.104. ábrán lévő megfogó szerkezet esetén. Az ábrából látható, hogy a szorítómechanizmus a megfogó ujjat (megfogó pofát) párhuzamosan mozdtítja el.



4.104. ábra

A 4.105. ábra  $D'$  pontjának  $D''$  helyzetbe kerüléséből adódó vízszintes elmozdulás:

$$\Delta = b_1(1 - \cos\delta). \quad (4.132)$$



4.105. ábra

Ugyanezen pont függőleges elmozdulása pedig a 4.105. ábra  $O_1FE$  derékszögű háromszöge és a geometriai méretek ismeretében

$$b_1 \sin \delta = \frac{R_1}{\sin \gamma} + k - \frac{e}{2} - c \quad (4.133)$$

összefüggéssel fejezhető ki. Rendezzük (4.133)-at

$$\sin \delta = \frac{\frac{R_1}{\sin \gamma} + k - \frac{e}{2} - c}{b_1} \quad (4.134)$$

alakra és a négyzetes összefüggést felhasználva (4.132)-ből a szerszámközéppont eltolódásra

$$\Delta = b_1 - \sqrt{b_1^2 - \left(\frac{R_1}{\sin \gamma} + k - \frac{e}{2} - c\right)^2} \quad (4.135)$$

egyenletet kapjuk.

A megfogó ujjat megvalósító szorítópofa szorítófelületét a  $\gamma = \text{áll. nyílásszög}$  jellemzi, a szorítófelület ebből adódóan síkfelület. Amennyiben a szorítófelületet úgy alakítjuk ki, hogy  $\gamma \neq \text{áll.}$ , - ebben az esetben a szorítófelület görbe felület - akkor  $\gamma = \gamma(R_1; \delta)$ .

A (4.135) összefüggés alapján  $\Delta = 0$  érték csak (4.134) nulla értéke mellett adódik, ami azt jelenti, hogy a megfogó szerkezetet nem lehetne nyitni vagy zárni.

A 4.106. ábrán jelölje  $P_o$  pont a  $\delta = 0$  megfogási szöghöz tartozó megfogó pofa szorítási pontot,  $P$  pedig legyen egy általános megfogási szöghöz tartozó szorítási pont. A BPS derékszögű háromszög alapján a szorítási felület érintőjére a

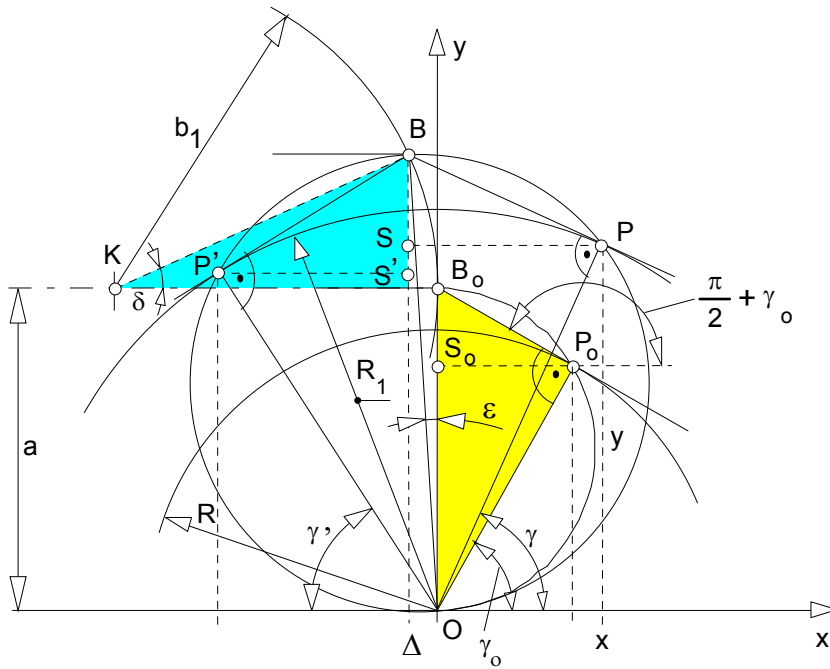
$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} = \frac{R_{1j} \cos \gamma + b_1(1 - \cos \delta)}{a - b_1 \sin \delta - R_{1j} \sin \gamma} \quad (4.136)$$

egyenletet kapjuk, amelyet átrendezve

$$R_{1j} = a \sin \gamma - b_1 \cos \gamma + b_1 \cos(\gamma + \delta) \quad (4.137)$$



$$R_{1j} = a \sin \gamma - b_1 \cos \gamma + b_1 \cos(\gamma - \delta) \quad (4.141)$$



4.107. ábra

adódik. A  $BP'S'$  derékszögű háromszög alapján (4.138)-hoz hasonlóan

$$\operatorname{tg} \gamma' = \frac{\sin \gamma'}{\cos \gamma'} = \frac{R_{1b} \cos \gamma' - b_1 (1 - \cos \delta)}{a + b_1 \sin \delta - R_{1b} \sin \gamma'} \quad (1.142)$$

egyenletet kapjuk, amelyből

$$R_{1b} = a \sin \gamma' + b_1 \cos \gamma' - b_1 \cos(\gamma' + \delta). \quad (1.143)$$

A további vizsgálatainkat a 4.107. ábrán vázolt  $R_1 > R$  esetekre végezzük el. Az ábrából könnyen belátható, hogy  $P$  és  $P'$  szorítási pontokhoz tartozó sugaraknak a teljes szorítási tartományban meg kell egyezni, tehát

$R_{1b} = R_{1j}$ , ezt mutatják az ábrán az  $OP$  és az  $OP'$  szakaszok. Mivel  $\overline{BP}$  és

$\overline{BP'}$  a körhöz külső pontból húzott érintő szakaszok, azoknak is egymással egyenlőnek kell lenni, ebből következik, hogy OPB és OP'B derékszögű háromszögek egybevágóak, tehát a  $BOP \angle$  és a  $BOP' \angle$  is azonos. Ezt az azonosságot a

$$\frac{\pi}{2} - \gamma + \varepsilon = \frac{\pi}{2} - \gamma' - \varepsilon \quad (4.144)$$

összefüggéssel fejezhetjük ki, amelyből

$$\gamma = \gamma' + 2\varepsilon. \quad (4.145)$$

A 4.107. ábra alapján

$$\varepsilon = \arctg \frac{b_1(1 - \cos\delta)}{a + b_1 \sin\delta}, \quad (4.146)$$

amelyet (4.145)-be helyettesítve,

$$\gamma = \gamma' + 2 \arctg \frac{b_1(1 - \cos\delta)}{a + b_1 \sin\delta} \quad (4.147)$$

összefüggéshez jutunk. (4.147)-ből megállapítható, hogy  $\gamma = \gamma(\delta)$ , de  $\gamma'$ -re nincs egzakt előírásunk. Ez a 4.107. ábra alapján belátható, hiszen P' szorítási pont a BO átmérő fölé rajzolt Thales körön bárhol felvehető, amely meghatározza a megfogandó tárgy átmérőjét és a szorítási felület érintőjét. A P' pontnak ez a szabadon való felvétele bármely  $\delta$  megfogási szöghelyezethez értelmezhető, ami azt is jelenti, hogy a megfogási szöghelyezetekhez az egyik szorítási pontot jellemző szög tetszőlegesen felvehető;

$$\gamma' = g(\delta). \quad (4.148)$$

A továbbiakban két esetet vizsgáljunk meg:

- $\gamma' = \gamma_0 = \text{állandó},$
- $\gamma' = \gamma_0 + n\varepsilon(\delta),$

ahol  $n = 0, 1, 2, \dots, N$  egészszám.

**a) Megoldás  $\gamma' = \gamma_0$  esetén**

Ebben az esetben a baloldali szorítási pontot jellemző szög  $\gamma' = \gamma_0 =$  állandó, a jobboldali szorítási pontot jellemző szög pedig (4.147) felhasználásával

$$\gamma = \gamma_0 + 2 \arctg \frac{b_1 (1 - \cos \delta)}{a + b_1 \sin \delta} \quad (4.149)$$

összefüggéssel fejezhető ki. Ennek ismeretében a jobboldali szorító felület érintőjének az irántangense:

$$v_j(\delta) = \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} + \gamma \right). \quad (4.150)$$

A szorítófelület (a szorító pofa) kontúrgörbéje (4.150) felhasználásával

$$w_j(\delta) = w_j(0) + \int_0^\delta v_j(\delta) \left( \frac{dx_j}{d\delta} \right) d\delta, \quad (4.151)$$

$$x_j(\delta) = R_{1j} \cos \gamma \quad (4.152)$$

és az

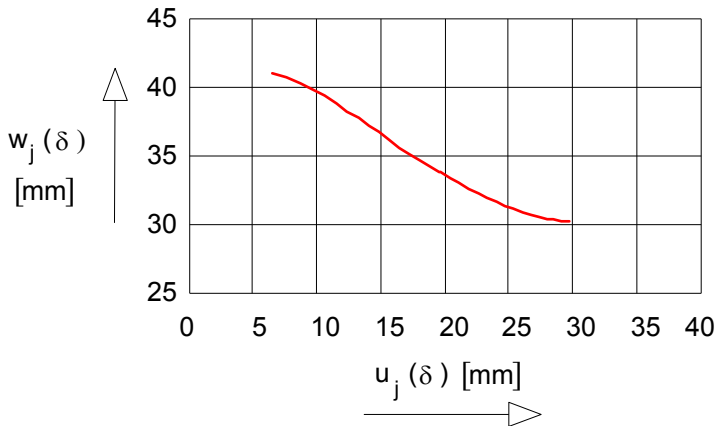
$$u_j(\delta) = x_j(\delta) + b_1 (1 - \cos \delta) \quad (4.153)$$

egyenletekkel írható le, ahol

$$w_j(0) = w_j(\delta = 0) = R_{1j} \sin \gamma_0. \quad (4.154)$$

Mivel a szorítópofa a megfogási sugár növelésével a megfogó szimmetria tengelye mentén önmagával párhuzamosan elmozdul, és elmozdulásának mértéke  $b_1 (1 - \cos \delta)$ , a szorítófelületet a megfogó szorítópofájához rögzített koordinátarendszerben kell értelmezni. Így a szorítófelület a (4.151) és (4.153) összefüggésekkel, mint paraméteres egyenletekkel leírható. A számítás értelemszerűen elvégezhető a 4.106. ábrán vázolt  $R_1 < R$  esetre is. A 4.108. ábra a fentiekben leírt módszer alapján kiszámított szorítófelület

kontúrgörbét mutatja;  $a = 45[\text{mm}]$ ,  $b_1 = 100[\text{mm}]$ ,  $\gamma_o = 60^\circ$  és  $\delta = 0 - 15^\circ$  értékekre.



4.108. ábra

A baloldali szorítófelület  $\gamma' = \gamma_o$  állandó volta miatt síkfelület lesz. A jobboldali szorítófelületet a 4.108. ábrán vázolt kontúrgörbére illeszkedő egyenes alkotójú felületként értelmezhetjük. A 4.109. ábra a két felületet mint megosztott szorítópofákat mutatja.

#### b) Megoldás $\gamma' = \gamma_o \pm n\varepsilon(\delta)$ esetén

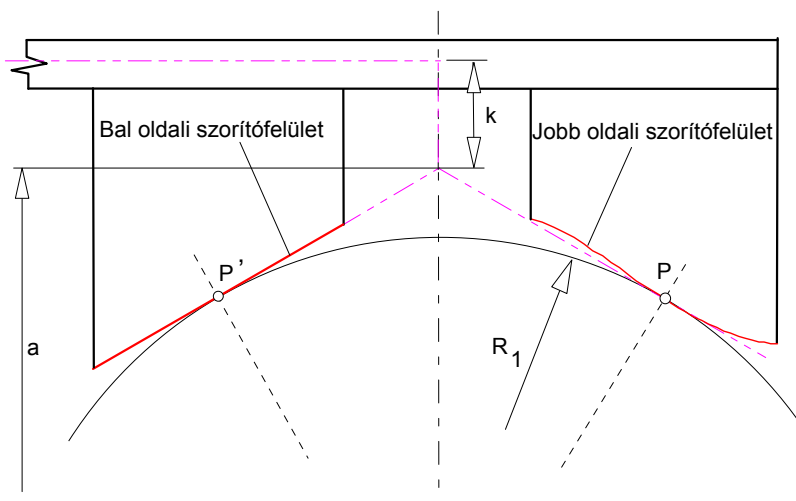
A baloldali szorítási pontot jellemző szög ebben az esetben

$$\gamma' = \gamma_o + n\varepsilon(\delta) \quad (4.155)$$

egyenlettel jellemezhető, a jobboldali szorítási pontra pedig (4.145) és (4.146) felhasználásával

$$\gamma = \gamma_o + (2 - n) \arctg \frac{b_1(1 - \cos \delta)}{a + b_1 \sin \delta} \quad (4.156)$$





Megfogó szorítópofa profilok  
(Megosztott profil,  $\delta = 0$  megfogási helyzethez)

4.109. ábra

összefüggést kapjuk. A fenti szögek ismeretében a szorítófelületek érintőjének iránytangenseit a

$$v_j(\delta) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \quad (4.157)$$

és a

$$v_b(\delta) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \gamma'\right) \quad (4.158)$$

egyenletek adják. Az előző ponthoz hasonlóan a szorítófelületek kontúrgörbéit (4.157) és (4.158) integrálásával határozhatjuk meg, a jobb oldalon;

$$w_j(\delta) = w_j(0) + \int_0^{\delta} v_j(\delta) \left(\frac{dx_j}{d\delta}\right) d\delta, \quad (4.159)$$

$$x_j(\delta) = R_{1j} \cos \gamma \quad (4.160)$$

és

$$u_j(\delta) = x_j(\delta) + b_1(1 - \cos \delta), \quad (4.161)$$

illetve a bal oldalon

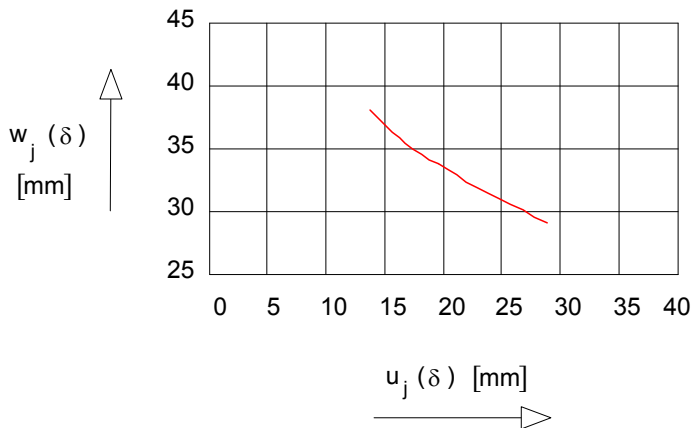
$$w_b(\delta) = w_b(0) + \int_0^{\delta} v_b(\delta) \left( \frac{dx_b}{d\delta} \right) d\delta, \quad (4.162)$$

$$x_b(\delta) = R_{lb} \cos \gamma', \quad (4.163)$$

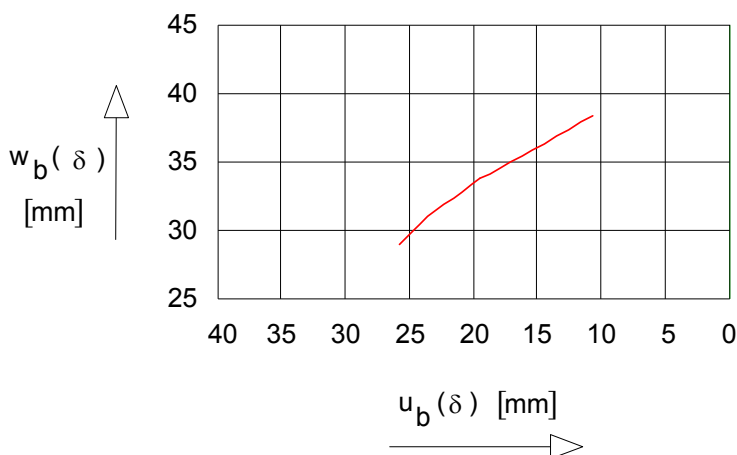
és az

$$u_b(\delta) = x_b(\delta) - b_1(1 - \cos \delta) \quad (4.164)$$

összefüggésekkel. A szorítófelületek paraméteres egyenletei a jobboldalon (4.159) és (4.161) a baloldalon pedig (4.162) és (4.164) összefüggések. A szorítófelületek fenti egyenletek alapján kiszámított kontúrgörbéit,  $a = 45$  [mm],  $b_1 = 100$  [mm],  $\gamma_0 = 60^\circ$  és  $\delta = 0 \approx 10^\circ$  értékekre a 4.110. és 4.111. ábra szemlélteti.

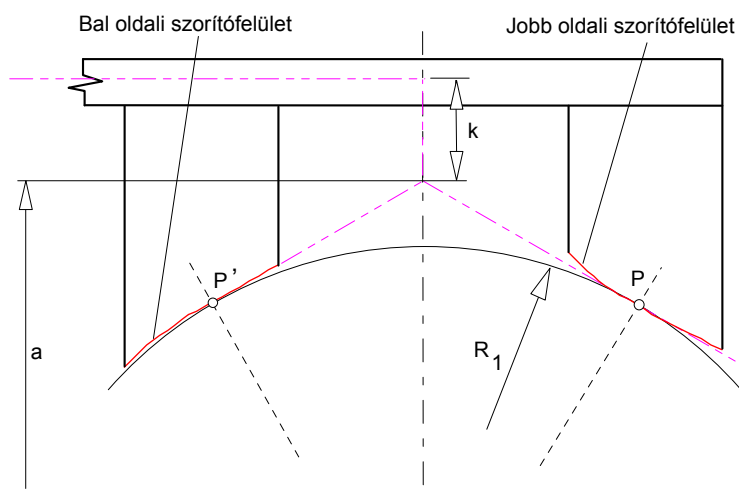


4.110. ábra



4.111. ábra

A fenti kontúrgörbékkel megvalósított szorítópofa látható a 4.112. ábrán.

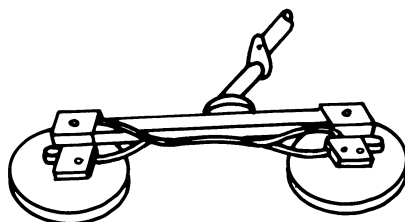


Megfogó szorítópofa profilok  
(Megosztott profil,  $\delta = 0$  megfogási helyeztetés)

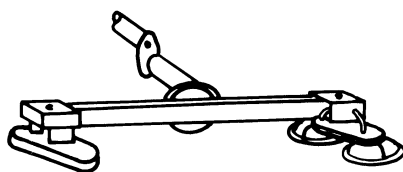
4.112. ábra

#### 4.5.5. Egyéb megfogó szerkezetek

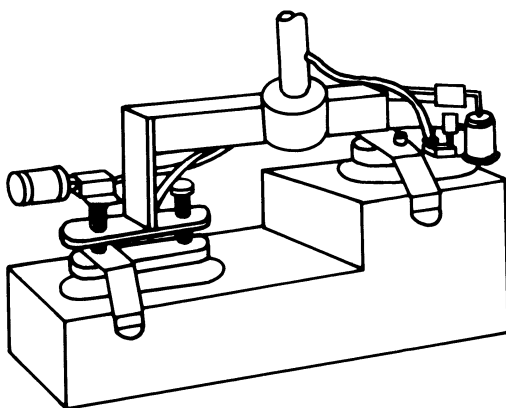
Különböző alakú és tulajdonságú anyagok megfogása szerkezeti kialakítását tekintve eltérő megfogó szerkezeteket igényel. A 4.113. ábra egy lemez megfogására alkalmas vákuumos megfogó szerkezetet mutat.



a.)



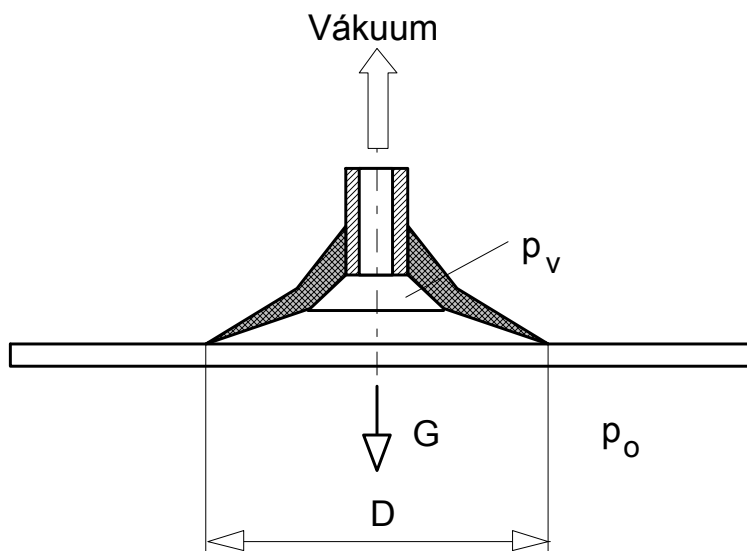
b.)



c.)

4.113. ábra

A megfogó legfontosabb része egy gumi vagy műanyag tapadókorong, amelynek belsejében egy vákuumszivattyú segítségével a külső (légköri) nyomásnál kisebb nyomást valósítunk meg. A nyomáskülönbség által a tapadó felületre ható erő biztosítja a munkadarab megfogását. A megfogás feltétele a 4.114. ábra alapján;



4.114. ábra

$$\frac{D^2 \pi}{4} (p_o - p_v) \geq G, \quad (4.165)$$

ahol  $p_v$  a vákuumszivattyú által a tapadó korongban létrehozott nyomás,  $p_o$  a külső nyomás,  $D$  a tapadókorong átmérője,  $G$  pedig a megfogandó test súlya. A 4.114. ábra alapján belátható, hogy a megfogás elve ez esetben erőzáró megfogás.

Ha a tapadókorongok helyett mágneset alkalmazunk teljesen hasonló megfogási elvhez jutunk.

#### 4.6. Robotok szenzorikai elemei

A robotoknak működésük bizonyos fázisairól és a kiszolgált technológiai folyamatról különféle információkkal kell rendelkezni. Ezeknek az in-

formációknak az előállítására szolgálnak a szenzorok. A szenzor által előállított információnak olyan tulajdonságokkal kell rendelkeznie, hogy azok a robot irányítórendszere számára értelmezhető és értékelhető legyen.

A szenzorok különböző kritériumok szerint csoportosíthatók. Az egyik leggyakrabban alkalmazható csoportosítás a környezetből való információ felvétel módja. Így megkülönböztethetők

- érintkezéssel,
- érintkezés nélküli

szenzorok. Az információkat vagy a szenzor és a mérendő test közötti kölcsönhatáson alapuló elv, vagy pedig a szenzorhoz kapcsolt közeg (részecske, mágneses tér, elektromágneses hullám stb.) pillanatnyi jellemzői alapján kapjuk. A szenzorok struktúrája az alkalmazott mérő átalakító elemtől és a fizikai hatáselemtől függ. A mérő átalakító elemek lehetnek;

- aktív,
- passzív.

A passzív átalakítók változó fizikai mennyiségei; ellenállás, induktivitás, kapacitás stb. Az aktív átalakítók kimeneti jellemzői; feszültség, áram, töltés, stb.

Az érintkezéssel szenzorok alkalmazási területe nagyon széles, átfogja a geometriai jellemzők (helyzet-, alak-, útinformáció) és a fizikai jellemzők (tömeg, erő, nyomaték stb.) meghatározásának módjait. Robotok esetén ezen szenzorok felhasználhatók;

- a környezettel való kapcsolattartásban, erő, nyomaték, út (helyzet) érzékelésére,
- a megfogó szerkezetben erő és elmozdulás behatárolására,
- a karokon erő, nyomaték, elmozdulás (szögelfordulás) értékének meghatározására,
- a hajtórendszerben erő, nyomaték, nyomás, áramerősség és feszültség mérésére.

Az érintkezés nélküli szenzorokat leginkább útmérésre, kisebb mértékben pedig alakfelismerésre használják. Alkalmazásuk nagy előnye az objektumok érintkezés nélküli érzékelése és ebből adódóan a mérőerő (tapintóerő) és határainak kiküszöbölése.

A robotok működését meghatározó szenzorokat azok elhelyezkedését és a kiszolgált technológiákhoz való kapcsolódását tekintve két csoportra oszthatjuk;

- belső,
- külső

szenzorok.

### 4.6.1. Belső szenzorok

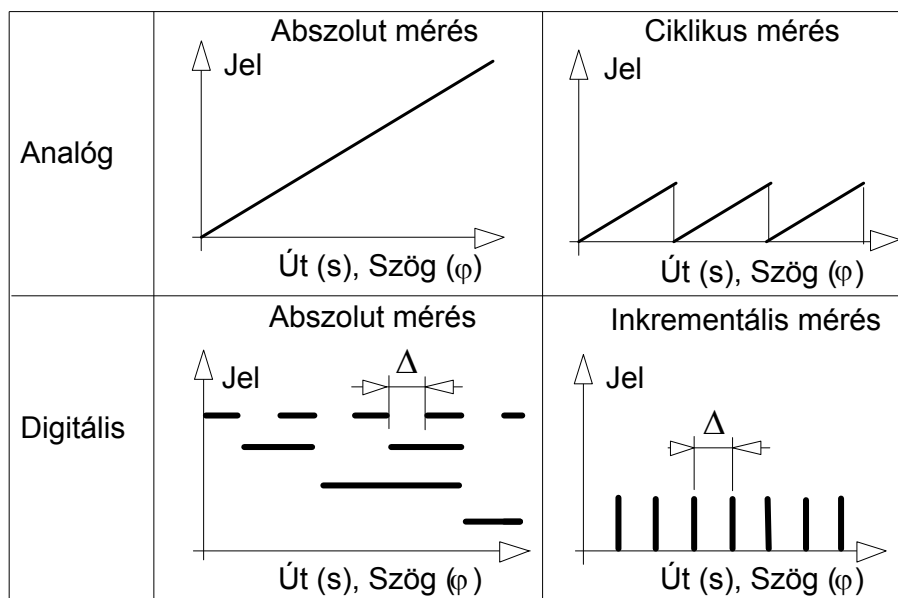
A belső szenzorok a robotmechanikára, a hajtórendszerre és a megfogószerkezetre telepítettek, funkciójukat tekintve útmérők (szögadók), szögsebességmérők (tachométerek), erő- és nyomatékmérők. Ezek közül a továbbiakban részletesen az útmérőket és a szögsebességmérőket tekintjük át.

#### a) Útmérők

Az útmérők a robotkarok csuklókoordinátáit realizáló szögelfordulások és elmozdulások pillanatnyi értékének meghatározására szolgálnak. Mérési elvüket tekintve lehetnek;

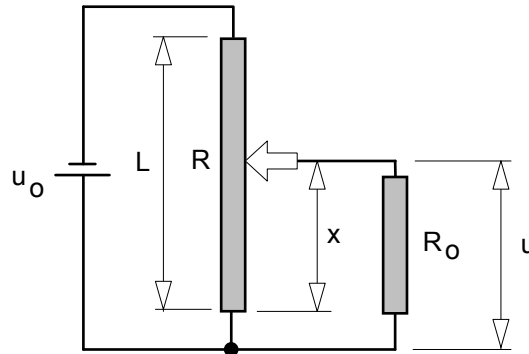
- abszolút,
- relatív (ciklikusan abszolút),
- inkrementális

rendszerűek, a mérési adatképzésük pedig analóg és digitális jelekkel történik (4.115. ábra).



4.115. ábra

Elsőként az abszolút-analóg útmérő útmérési elveit nézzük meg. Az útmérő egyik típusa kialakítását tekintve egy potenciométer, amelynek hosszúsága elméletileg megegyezik a robotkar maximális elmozdulásával ( $L$ ) vagy szögelfordulásával, a robotkar pillanatnyi helyzetét pedig jellemezze az  $x$  koordináta (4.116. ábra).



4.116. ábra

Az ábra szerint az  $x$  koordinátaához tartozó jel szint

$$u = u_o \frac{x}{L} \left[ 1 + \frac{R}{R_o} \left( \frac{x}{L} \right) \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \right]^{-1}. \quad (4.166)$$

(4.166) összefüggés sorba fejtésével az útmérő kimeneti jelszintjére

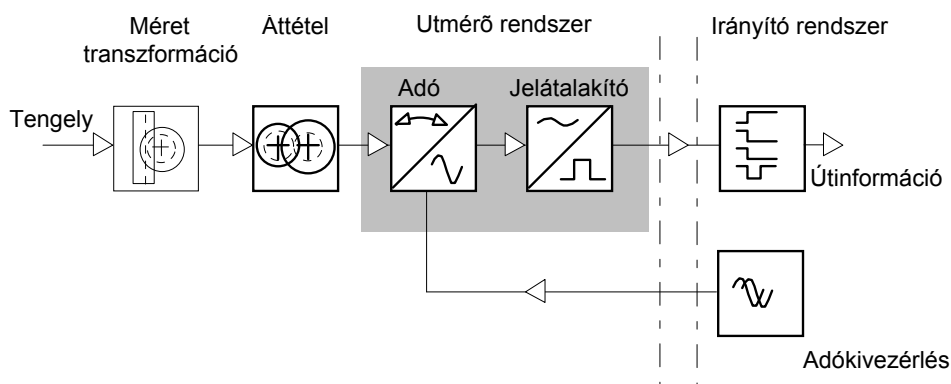
$$u = u_o \frac{x}{L} \left[ 1 - \frac{R}{R_o} \left( \frac{x}{L} \right) \left( 1 - \frac{x}{L} \right) + \dots \right] \quad (4.167)$$

adódik. Ha az útmérő kimeneti ellenállása  $R_o \gg R$  (az útmérő elem ellenállása), akkor a (4.167) kifejezés az  $x$  elmozdulás koordinátájának lineáris függvénye.

A potenciométerrel való mérés elvén nemcsak elmozdulás, hanem szögelfordulás is mérhető. Ez esetben forgó potenciométert alkalmazunk. Forgó potenciométerrel történő útmérés esetén tapasztaljuk, hogy a mérendő szögelfordulás nagyobb, mint a potenciométer mérési tartománya. Ilyen esetben a potenciométer előtt egy méret transzformációt, megvalósító áttételt, vagy pedig ún. növekményes potenciométert kell alkalmazni.



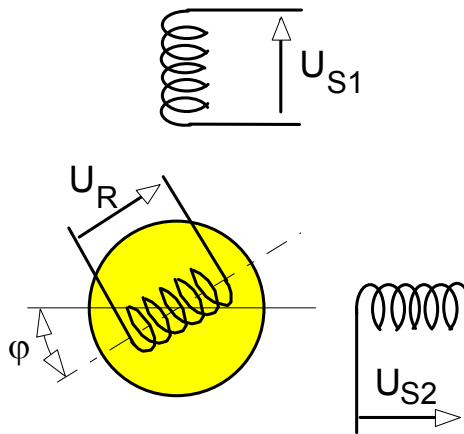
A fenti útmérési módszert pontatlansága miatt ma már a robotokban ritkán alkalmazzák. Helyettük sokkal korszerűbb útmérő rendszerek terjedtek el, amelyeket az ipari gyakorlat, forgó adók elnevezéssel illet. Általános jellemzőjük, hogy jelképzésük forgó elemekkel történik, és mechanikailag a programozott mozgást megvalósító hajtóegységhez kapcsolódnak. Mivel a hajtómotor mozgásciklus alatti szögelfordulása eltér a robotkar szögelfordulásától, a mérettartományok közötti különbséget korrigálni kell. A korrekció végbemehet mechanikus hajtómű alkalmazásával, vagy elektronikus úton. A forgóadók általános felépítését a 4.117. ábra mutatja.



4.117. ábra

A forgóadók közül a következőkben az analóg abszolút, a digitális abszolút és az inkrementális rendszereket tekintjük át.

Az analóg abszolút rendszerek közül legelterjedtebben a rezolvereket alkalmazzák. A rezolver kétfázisú állórésszel és egyfázisú forgórésszel rendelkező speciális forgóadó, elvi felépítését a 4.118. ábra mutatja. Az állórész tekercsei merőleges elrendezésűek. A forgórész tengelye közvetlenül, vagy hajtómű közbeiktatásával kapcsolódik a robot hajtott tengelyéhez vagy a hajtómotorhoz. A forgórész helyzete a  $\varphi$  szöggel jellemezhető, amely egyben a robotkar pozícióját is jellemzi. Az útinformációk meghatározására – a rezolver működtetésétől függően – különböző módszerek ismertek. Leggyakrabban a forgórész tekercsben indukálódó feszültséget alkalmazzák kimenőjelnek.



4.118. ábra

Legyen

$$\begin{aligned} u_{s1} &= U_o \sin \omega t \\ u_{sz} &= U_o \cos \omega t \end{aligned} \quad (4.168)$$

az állórész tekercsre kapcsolt feszültség, akkor a forgórész álló állapotában vagy

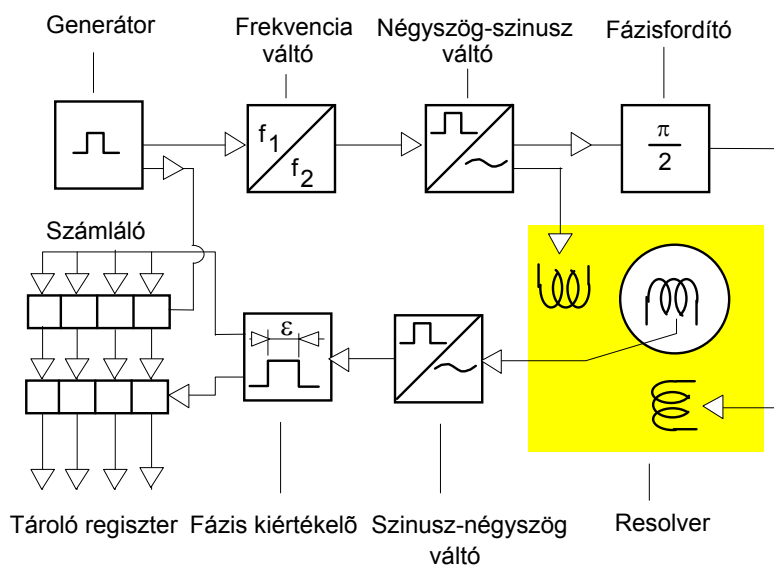
$$\omega_o = \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.169)$$

szögsebességgel való forgása esetén  $\omega_o \ll \omega$  a forgórészben indukálódó feszültség;

$$u_R = k U_o \sin(\omega t - \varphi) = U_R \sin(\omega t - \varphi), \quad (4.170)$$

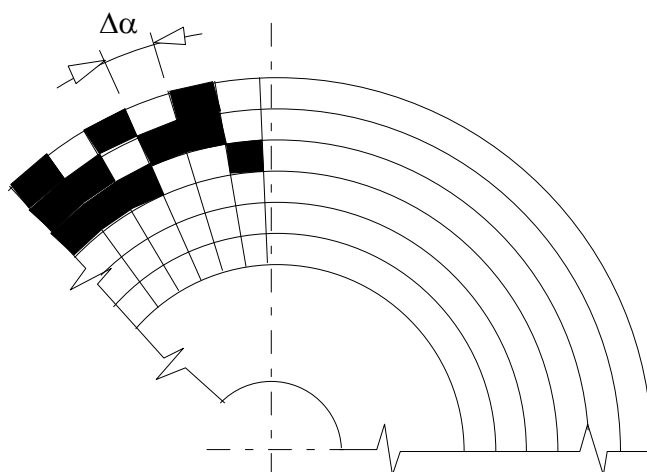
ahol  $k$  a feszültségátvitel.

A  $\varphi$  forgórész szöghelyzet (4.170) alapján megegyezik az  $U_R$  és  $U_{s1}$  közötti villamos fáziseltolódás szögével. A fáziseltolási szög pontos meghatározását kiértékelő áramkörök végzik (4.119. ábra).



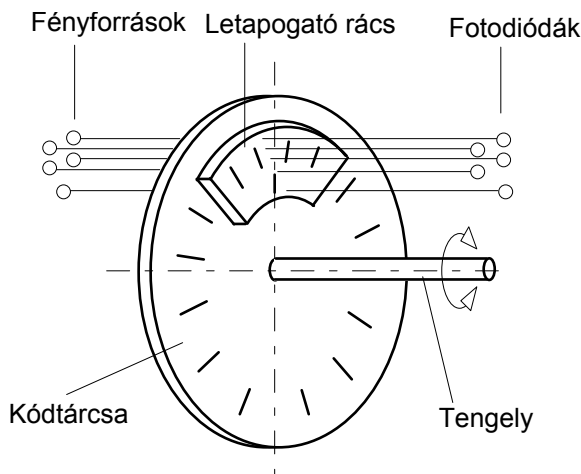
4.119. ábra

Az abszolút-digitális mérőrendszerek az út- és szöghelyzetet egy számkód segítségével határozzák meg. A hajtómotorhoz kapcsolt forgó-adó kódtárcsáját  $\Delta\alpha$  szélességű szektorként sugárirányban kódolják - 4.120. bára - a kódokat optikai úton olvassák le. Általában olyan kódokat alkalmaznak, amelyeknél a szomszédos kódok között csak egy bit eltérés van.



4.120. ábra

Az inkrementális útmérő rendszerek mérőeleme egy inkrementális elfordulás kódadó, amely a tengelyének elfordulásával arányos jelsorozatokat szolgáltat (4.121. ábra).



4.121. ábra

A jelsorozat kétféle lehet, négyszögimpulzus vagy szinuszos. A készülék fordulatonként egy nulla jelet is előállít. A jeleket a forgó kódtárcsa indikálja, az értékelés fotodiódák segítségével történik. A fordulatonkénti jelek száma azonos a kódtárcsa osztásával.

A mérőrendszerben képződő jelek az alábbiak:

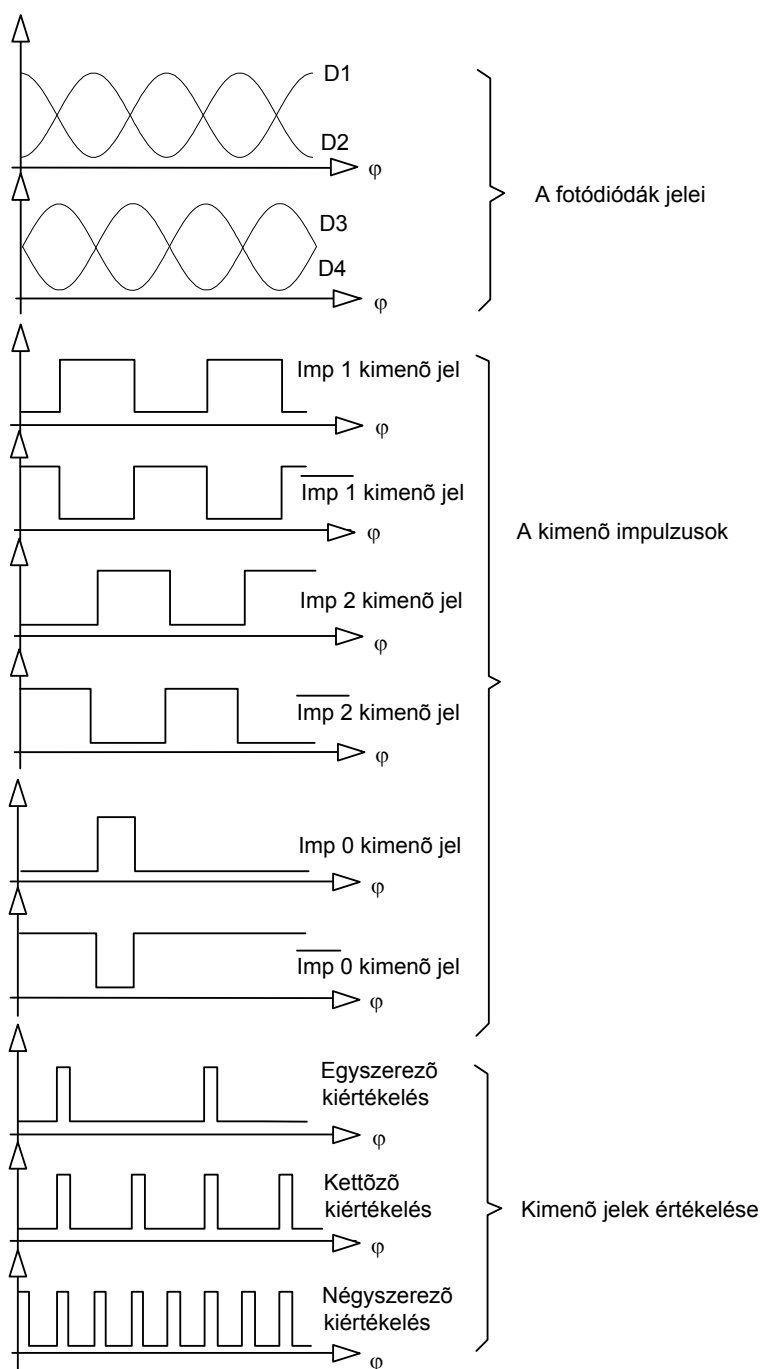
- érzékelő fotodiódák jelei,
- egymáshoz képest  $90^\circ$ -os fáziseltolású impulzussorozatok,
- impulzusok negáltjai.

Abban az esetben, ha a kimenőjelek szinuszosak, a kimeneten egymáshoz képest  $90^\circ$ -os fáziseltolású szinuszos jelek jelennek meg. Négyszög impulzus jelű kimenet esetén lehetőség van egy-, két-, illetve négyszerező kiértékelésre. A fáziseltolás lehetővé teszi a forgásirány megállapítását. A nulla impulzus jel az alábbi feladatokra használható fel;

- az alaphelyzet reprodukálása,
- az egész fordulatok számlálása,
- zavarimpulzusok kimutatása.

A negált impulzusok az adó és a kiértékelő vezetéken keletkező zavarimpulzusok kiküszöbölésére szolgálnak.

A kimenő impulzusok és a kimenő jelek értékelését a 4.122. ábra mutatja.



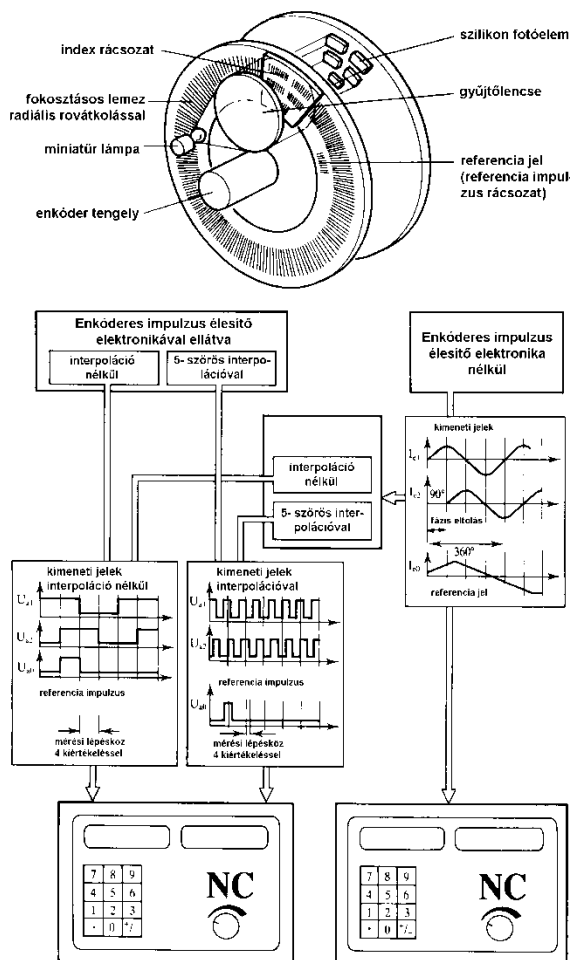
4.122. ábra

Az inkrementális forgóadók legfontosabb jellemzői:

- az egy körbefordulásra jutó impulzusok száma  $z$ ;
- a felbontóképesség;  $\Delta = \frac{360^\circ}{z}$ .

E két jellemzőből a mérőrendszerre, illetve a mérés pontosságára még további értékelő tényezők származtathatók.

Robottechnikában és általában a számjegyes vezérléstechnikában leggyakrabban alkalmazott inkrementális útmérő rendszer a HEIDENHAIN forgódó, amelynek felépítését és jelfeldolgozási rendszerét a 4.123. ábra mutatja.



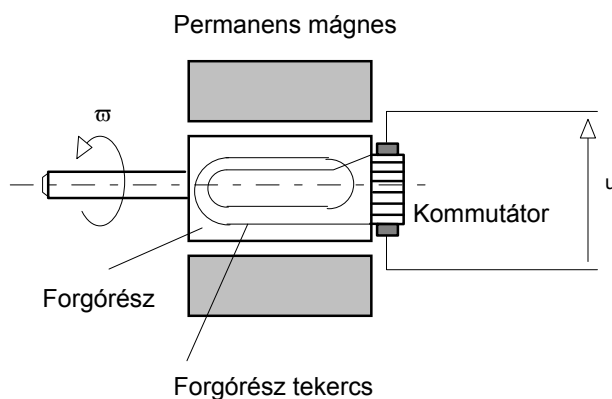
4.123. ábra

### b) Fordulatszám-érzékelők

A fordulatszám-érzékelők a hajtásszabályozások minőségi javításához szükséges jelek előállítására szolgálnak. Leggyakrabban használt típusaik:

- analóg fordulatszám-érzékelők,
- digitális fordulatszám-érzékelők.

Az analóg fordulatszám-érzékelők (tachométerek) legtöbb típusuk az egyenáramú motorok inverzeként működik, forgási energiát alakítanak át villamos energiává. A kimenő jele feszültség. Egy egyenáramú típus működési elvét a 4.124. ábrán követhetjük végig. Állandó mágneses teret



4.124. ábra

biztosító permanens mágnes között tekercset forgatva a fordulatszámmal arányos jelet kapunk

$$u(t) = K\omega(t) = K \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (4.171)$$

A digitális fordulatszám-érzékelők a fordulatszámot nagyfelbontású inkrementális szöghelyzetadók meghatározott mintavételi idő alatt mért szögelfordulásából határozzák meg.

### c) Erő- és nyomatékszenzorok

Az erő- és nyomatékszenzorok általában a hajtórendszerek és a technológiai folyamattal, közvetlen kapcsolatba lévő megfogó szerkezetek és szerzőszámok működését szabályozzák. A szenzorok működési elve mérőelemének

alakváltozásán alapul, amely nyílásmérő bélyegek segítségével ellenállás változássá, illetve feszültségváltozássá alakítható.

#### 4.6.2. Külső szenzorok

A külső szenzorok biztosítják a kapcsolatot a robot és a környezete között. Mivel a robot alkalmazási környezete elég változatos ezért még ma is különböző megoldásokkal próbálkoznak a külső szenzor alkalmazások és a fejlesztések terén. A 90-es években végzett felmérések tíz alkalmazási területet tekintettek át:

- az öntést,
- a kovácsolást,
- a palettázást és az egyszerű alkatrész összerakást,
- a ponthegeztést,
- a festékszórást,
- az ívhegeztést,
- a sorjátlanítást,
- az automatikus ellenőrzést,
- a gyártócellában való alkalmazást és
- az automatizált szerelést

abból a célból, hogy a robot-alkalmazások hatékonyságát növeljék. A felmérés eredményei azt mutatták, hogy a fenti alkalmazási területek közül hétben a külső érzékelés a legfontosabb. A külső szenzorok minőségének javítása pl. lehetővé teszi, hogy a technológiai folyamat tűréshatáron kívüli eltéréseit is kezelni lehessen.

A külső szenzorok által szolgáltatott információk a robot intelligencia szintjét növelik, segítségükkel módosíthatók az eredeti mozgáspályákat megvalósító programok.

A külső szenzorok két nagy területe fejlődött ki, a

- tapintóérzékelés,
- látóérzékelés

megvalósítására.

A tapintóérzékelés ún. bináris érzékelés. A szenzor csak azt észleli, hogy a robot kapcsolatba került-e valamilyen tárggyal, de nem azonosítja, hogy milyen tárgyról van szó. Ilyen bináris szenzor pl. az a piezoelektromos műanyag, amely mechanikai behatásra villamos jelet ad, vagy a kapacitív és induktív alapú szenzorok. Alkalmazásuk körültekintést igényel, a környezet zavaró hatásait figyelembe kell venni.



A látóérzékelők a robot legfejlettebb szenzorai közé tartoznak. Jelenleg nyolc fő típusuk ismeretes:

- kétdimenziós látóérzékelő különálló tárgyak bináris érzékelésére,
- kétdimenziós látóérzékelő különálló tárgyak szürke árnyalatai szerinti érzékelésére,
- kétdimenziós látóérzékelő egymással érintkező vagy átfedésben lévő tárgyak érzékelésére,
- kétdimenziós ellenőrző készülékek,
- kétdimenziós vonalkövetők,
- különálló tárgyról háromdimenziós információk kiszűrésére alkalmas rendszerek perspektivikus ábrázolás, sztereótechnika, strukturált megvilágítás vagy pásztázás keresés elvén,
- háromdimenziós információ kiszűrése rendezetlen tárgyhalmazokról,
- térbeli helyszínelemzés mobilrobotok navigációjához, útvonalkereséséhez és az akadályok elkerüléséhez.

E területen még sok fejlesztési lehetőség van hardver és szoftver oldalon egyaránt.

#### 4.7. Mobil robotok felépítése és jellemzői

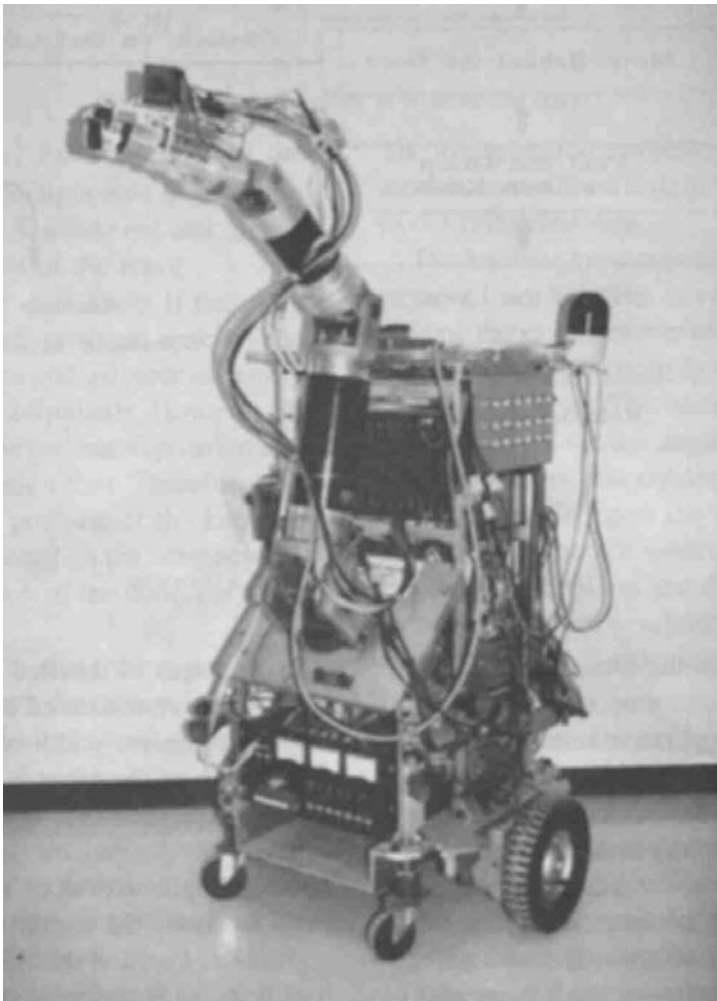
Az autonóm mobil robot fogalomnak a berendezések széles skálája felleltethető meg. Általánosságban azokat a berendezéseket nevezzük autonóm mobil robotnak, amelyek kialakítása (tervezése és kivitelezése) arra irányult, hogy olyan helyeken végezzenek munkát, ahol az emberek nem tudnak dolgozni. Ilyen például az űrkutatás, vannak más alkalmazási területek is alacsonyabb technológiai szinten. Egy autonóm mobil robot három funkcionális egységből áll:

- mechanikai szerkezet, hajtás és energiaforrás,
- irányító rendszer,
- anyagmozgató berendezés.

A mobil robotok egyrészt az űrkutatásban alkalmazott holdjárművektől, másrészt az automatizált anyagmozgatásban alkalmazott - indukciós nyomvezetésű - vezetónélküli targoncáktól származtathatók.

A kiindulási definíciót figyelembe véve, a kezdeti elképzelés a mobil robotok szerkezeti kialakítására az volt, hogy egy vezető nélküli kocsiszerkezeten egy, a 4.1. fejezet pontban megismert robotot helyeznek el,

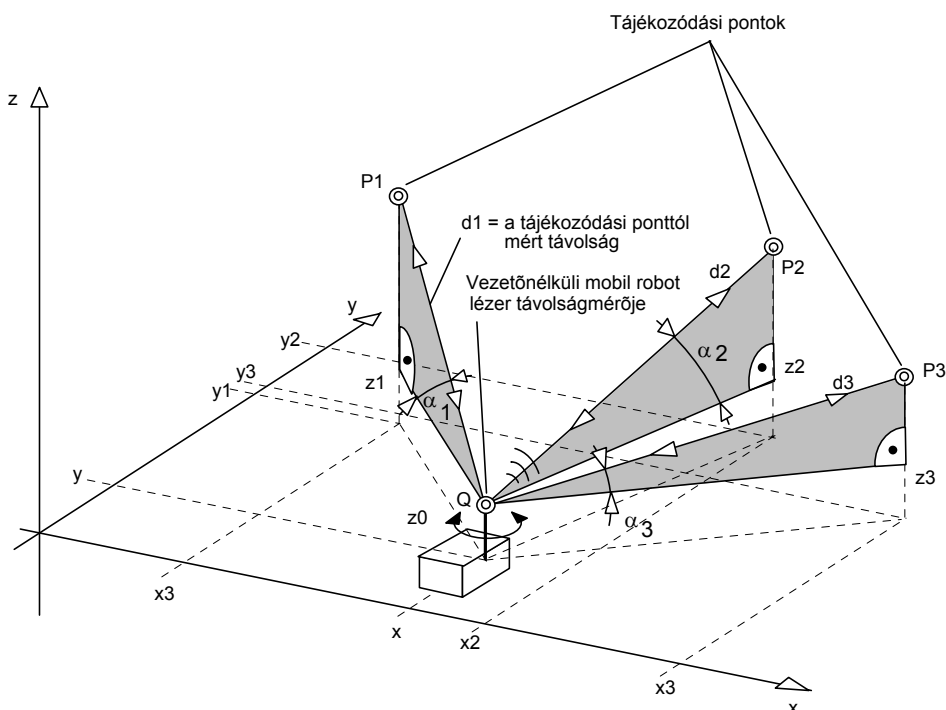
amely térben meghatározott helyen alkalmas technológiai feladat ellátására. Egy ilyen elven felépülő mobil robotot mutat a 4.125. ábra.



4.125. ábra

Az alkalmazások során kiderült, hogy a gyakorlat oldaláról felvetődő igények jóval egyszerűbb munkavégző szerkezetet igényelnek (pl. nagy alapterületű műhelycsarnokok, hangárok aljzatbeton csiszoló berendezés) és külső szenzorok által szolgáltatott információk alapján mozgó vezető-nélküli kocsiszerkezetet. A kocsiszerkezet által befutott útvonal (pálya) többször olyan korlátozó feltételekkel rendelkezik, amelyet előre nem ismerünk, ezért az előre meghatározott útvonalat korrigálni kell. A külső szenzorokként látó

rendszereket (képfeldolgozó rendszereket) vagy lézeres navigációs rendszereket használnak. A lézeres navigáció elvét a 4.126. ábra mutatja, ahol  $P_1$ ;  $P_2$  és  $P_3$  pontok a térbeli tájékozódási pontjai  $Q$  pedig a vezetől nélküli kocsiszerkezeten lévő lézeres távolságmérő helyzetét jellemzi.



4.126. ábra

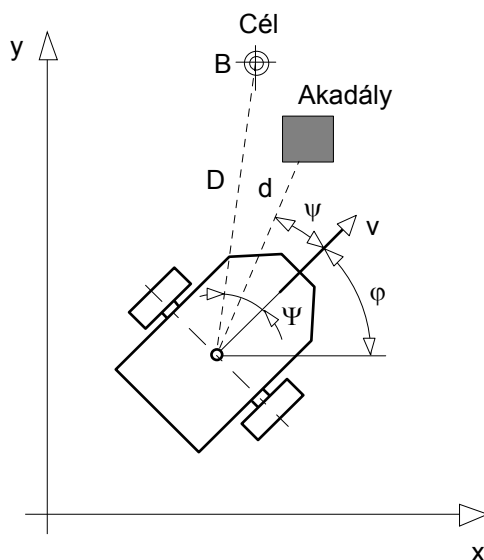
Az utóbbi időben a mobil robot megnevezés a külső szenzorral vezetett vezetől nélküli autonóm járművekre vonatkozik. Egy mobil robotot akkor nevezünk autonómnak, ha azt a feladatot, amelyre készült, külső energia felhasználása nélkül hajtja végre és döntési képességekkel van felruházva. Ezek a tulajdonságok szükségesek azon zavarok kiküszöböléséhez, amelyek a változó környezeti feltételekből adódnak. Miközben a környezet folyamatosan változik, az autonóm robotnak folyamatosan meg kell határozni a legmegfelelőbb útvonal megvalósításához szükséges beavatkozásokat. Az optimális feltételek eléréséhez stratégiákat kell definiálni. Ez adaptációs készséget feltételez, amelyet a fiziológiai adaptáció megfelelőjének lehet tekinteni mint szabályozási algoritmust. Az optimális beavatkozás tehát egy modell alapján, vagy a régi útvonal eseményekből megtanult eredmények alap-

ján történik. Ily módon az autonómia és az adaptáció szorosan összefüggnek.

A modell definíciója megköveteli a robot környezetének, és a lehetséges környezeti változatoknak a robot belső állapotára gyakorolt hatásának pontos ismeretét. Ezt az ismeretanyagot nagyon nehéz rögzíteni, különösen, ha a robot kültéren dolgozik, ahol a környezeti változatok száma nagy.

Abban az esetben, ha csak az akadályokat is kikerülő navigációs problémákra gondolunk, felvetődik az a kérdés, hogy érdemes-e meghatározni a robot teljes és precíz környezetét. Az ember navigációs képességei egyértelműen mutatják, hogy nem szükséges a pontos útvonal kijelölése (helykoordináták megadása) egy meghatározott cél irányába történő haladáshoz. Az ember csak a cél és az akadály relatív helyzetét érzékeli és ezt is csak akkor, ha ez az információ hasznos. Ebből következik, hogy a probléma megközelítésének második útja a válasz-hiba kísérleteken alapul és ez az eljárás navigációs célokra használhatóbbnak bizonyul. Ezek a feladatok hatékonyan kezelhetők Fuzzy illetve Neuro-Fuzzy módszerekkel. E könyv terjedelme meghaladja ezen módszerek ismertetését, csak a mobil robot útvonal realizálásának ezen problémáját mutatjuk be.

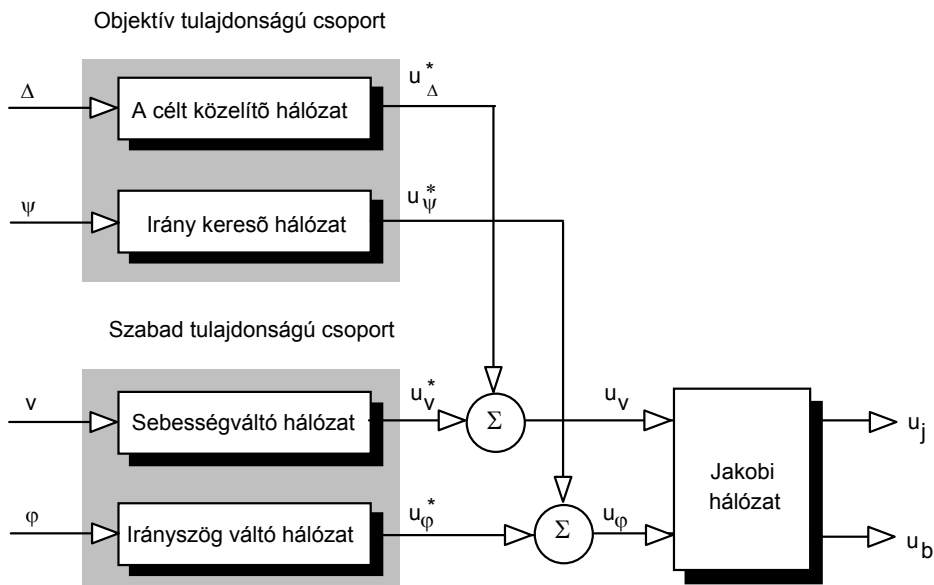
A mobil robotnak a 4.126. ábrán vázolt helyzetéből



4.126. ábra

kell a B pontként jelzett célba eljutni, miközben a lehetséges útvonalak némelyikén akadály van. A probléma egy Fuzzy típusú szabályozásának meg-

oldása látható a 4.127. ábrán. Az ábrán lévő Jacobi hálózat (részletes kifejtése az 5. fejezetben történik) egy koordináta transzformációt valósít meg



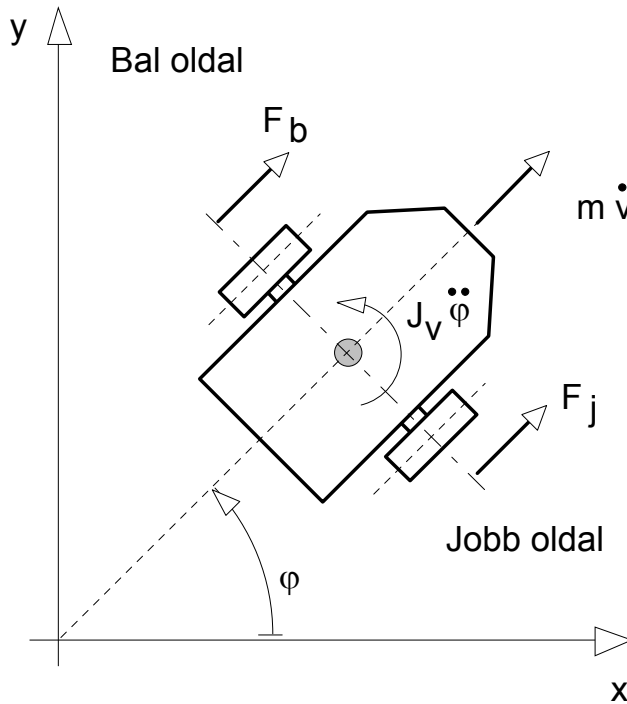
4.127. ábra

$$\begin{bmatrix} u_j \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2\ell} \\ \frac{r}{2} & -\frac{r}{2\ell} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_v \\ u_\varphi \end{bmatrix} \quad (4.172)$$

alakban, ahol  $u_j$  és  $u_b$  a hajtó kerekek által megtett út,  $u_v$  és  $u_\varphi$  paraméterek pedig a súlypont sebessége és szögsebessége, a Jacobi-mátrix pedig

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{\ell}{2r} \\ \frac{r}{2} & -\frac{\ell}{2r} \end{bmatrix}. \quad (4.173)$$

A probléma matematikai kezeléséhez írjuk fel a 4.128. ábra jelöléseivel a mobil robot mozgásegyenleteit.



4.128. ábra

A kocsiszekrényre felírt perdület- és impulzus tétel alapján:

$$\begin{aligned} J_v \ddot{\varphi} &= (F_j - F_b) \ell \\ m \dot{v} &= F_j + F_b \end{aligned} \quad (4.174)$$

illetve a kerekre felírt perdülettétellel

$$\begin{aligned} J_{ke} \ddot{\Theta}_j + c \dot{\Theta}_j &= k u_j - r F_j \\ J_{ke} \ddot{\Theta}_b + c \dot{\Theta}_b &= k u_b - r F_b \end{aligned} \quad (4.175)$$

egyenletek adódnak. (4.174) és (4.175)-ben az egyes változók és paraméterek jelentése az alábbi:

$J_v$ ; a robot kocsiszerkezetének tehetetlenségi nyomatéka,  
 $m$ ; a robot tömege,

$F_j, F_b$ ; a jobb- és baloldali hajtott kerekre ható kerületi erő,  
 $\ell$ ; a hajtott kerek távolságának fele,  
 $v$ ; a robot sebessége,  
 $\varphi$ ; a robot helyzetét jellemző szög,  
 $J_{ke}$ ; a robot hajtott kerek tehetetlenségi nyomatéka,  
 $c$ ; a kerek csillapítási tényezője,  
 $k$ ; hajtóerő tényező,  
 $r$ ; a hajtott kerek sugara,  
 $\Theta_j, \Theta_b$ ; a hajtott kerek szögelfordulása  
 $u_j, u_b$ ; a hajtott kerek által megtett út.

A mobil robot csúszásmentes merevtestszerű mozgását feltételezve  $\varphi$ ,  $v$ ,  $\Theta_j$  és  $\Theta_b$  paraméterek között az alábbi geometriai összefüggések írhatók fel:

$$\begin{aligned} r\dot{\Theta}_j &= v + \ell\dot{\varphi}, \\ r\dot{\Theta}_b &= v - \ell\dot{\varphi}. \end{aligned} \quad (4.176)$$

Képezzük az

$$\mathbf{x}(t) = [v(t) \quad \varphi(t) \quad \dot{\varphi}(t)]^T, \quad (4.177)$$

állapotváltozó, az

$$\mathbf{u}(t) = [u_j(t) \quad u_b(t)]^T \quad (4.178)$$

beavatkozó változó, és az

$$\mathbf{y}(t) = [v(t), \quad \varphi(t)] \quad (4.179)$$

kimeneti változó vektorokat, akkor (4.174), (4.175) és (4.176) egyenletekből

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (4.180)$$

összefüggéseket kapjuk. A (4.180) rendszeregyenletekben

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-2c}{mr^2 + 2J_{ke}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-2c\ell^2}{J_v r^2 + 2J_{ke}\ell^2} \end{bmatrix}, \quad (4.181)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{kr}{mr^2 + 2J_{ke}} & \frac{kr}{mr^2 + 2J_{ke}} \\ 0 & 0 \\ \frac{kr\ell}{J_v r^2 + 2J_{ke}\ell^2} & -\frac{kr\ell}{J_v r^2 + 2J_{ke}\ell^2} \end{bmatrix}, \quad (4.182)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.183)$$

(4.180) egyenletekből  $v$  és  $\varphi$  számítható, mint kimenő paraméter, amelyet 4.127. ábra hálózatának bemeneti adataként kezelünk.



#### 4.8. Ellenőrző kérdések

1. Mi jellemzi a derékszögű koordinátás robotot?
2. Hogyan jellemezhető a hengerkoordinátás robot TCP pontjának helyzete?
3. A gömbi koordinátarendszerű robot milyen paraméterekkel jellemezhető?
4. Milyen csuklókaros robotok ismertek, és mi a jellemzőjük?
5. A függőleges síkú csuklókaros robotoknak milyen típusai vannak és mi jellemzi őket?
6. Mi jellemzi a vízszintes síkú csuklókaros robotokat?
7. Milyen robot platformok vannak?
8. Mi a kinematikai lánc, hogyan jellemezhetjük őket?
9. Milyen kinematikai kényszerek vannak?
10. Hogyan értelmezzük a robotok munkatérét?
11. Milyen típusú robotoknál csonkul a munkatér, és mi az oka?
12. Miért szükséges a robotkarok tömegkiegyenlítése?
13. Milyen tömegkiegyenlítési eljárások vannak?
14. Mi jellemzi a súlykiegyenlítést?
15. Mi jellemzi a rugós kiegyenlítést?
16. A robotok milyen hajtórendszerekkel rendelkeznek, és mi a jellemzőjük?
17. Mi jellemzi a pneumatikus hajtási rendszert?
18. Mi a hidraulikus hajtási rendszerek jellegzetessége?
19. A villamos hajtási rendszereknek milyen csoportjai ismeretesek és mi a jellemzőjük?
20. A villamos hajtási rendszerek milyen mozgásátalakítókkal vannak ellátva?
21. A megfogó szerkezetek milyen megfogási elvet követnek?
22. Mi az erőzáró megfogás jellemzője?

23. Mi az alakzáró megfogás jellemzője?
24. A robotmozgás dinamikai jelenségei hogyan befolyásolják a megfogás biztonságát?
25. A munkadarabok méretváltozása hogyan befolyásolja a szerszámközéppont helyzetét, hogyan lehet megakadályozni annak elvándorlását?
26. A robotok szenzorikai elemeit hogyan osztályozzuk?
27. Milyen útmérő rendszereket alkalmaznak a robotokban?
28. A külső szenzorok milyen jellegzetességgel bírnak?
29. Mi jellemzi a mobil robotokat?
30. Mi a mobil robotok autonómiájának jellegzetessége?
31. Milyen módszerek vannak a mobil robotok útvonalának meghatározására?

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Allgaier, R.:** Meßmethoden zum Ermitteln der Orientierungs-genauigkeit von Industrierobotern. Industrieroboter International. Springer Verlag, 1986. 76. Nr. 10. p. 594-596.
- [2] **Asada, H. - Ma, Z. - Tokumaru, H.:** Inverse dynamics of flexible robot arms: modeling and computation trajectory control. Trans. ASME. J. Dyn. Syst. Meas. and Contr. 1990. 112. 2. p. 177-185.
- [3] **Behrens, A. - Berg, J. O.:** Positioniergenauigkeit von Industrierobotern (Geodätische Methoden eröffnen Wege zu ihrer Verbesserung). VDI-Z. 129 (1987) 3. 57-62 p.
- [4] **Bekjarow, B. - Lilov, L.:** Identifikation und Kompensation von Primärfehlern bei Industrierobotern. Maschinenbautechnik. Berlin, 36. 1987. 4. p. 167-169.
- [5] **Bililisco, S.:** The Mc Graw-Hill, Illustrated Encyclopedia of Robotics & Artificial Intelligence. Mc Graw-Hill, Inc. New-York, San Francisco, Washington, S.C. Auckland, Bogota, Caracas, Lisbon, Madrid, London, ect. 1994. p. 200.
- [6] **Brady, M. - Hollerbach, J.M. - Johnson, T.L. - Perez, T.L. - Mason, M.T.:** Robot Motion: Planning and control. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1982. p. 585.
- [7] **Blume, Ch. - Jakob, W.:** Ipari Robotok programozási nyelvei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987. p.227.
- [8] **Campos, L. - Hernandez, J.:** 1. IFAC Szimp. Robot Contr. Barcelona, 1985. Nov. 6-8. p. 371-374.
- [9] **Cawi, I. - Wambach, R.:** Fortschrittliche Lageregelung einer Roboterachse. Robotersysteme. Springer Verlag, 1988. Nr.4. p. 172-176.
- [10] **Chih-Hsib, Chen:** Applications of Algebra of Rotations in Robot Kinematics. Mech. Mach. Theory. Vol. 22. Nr. 1. p. 77-83.
- [11] **Coiffet, P.:** Robot Technology. Modelling and Control. Kogan Page. London, Prentice-Hall, Inc. Engelwood Cliffs, NJ 07632. 1983. p.160.
- [12] **Craig, J. J.:** Introduction to Robotics. Mechanics and Control Second Edition. Addison - Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts, Menlo, England, Amsterdam, Bonn, ect. 1986. p.450.

- [13] **Csáki, F.:** Korszerű szabályozásteória. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970. p.1085.
- [14] **Dillmann, R.:** Lernende Roboter, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, ect. 1988. p. 145.
- [15] **Dillmann, R. - Hogel, Th. - Meier, W.:** Ein Sensorintegrierter Greifer als modulares Teilsystem für Montageroboter. Robotersysteme. 1986. Nr.2. p.247-252.
- [16] **Doll, T. J.:** Entwicklung einer Roboterhand für die Feinmanipulation von Objecten. Robotersysteme, 1987.. Nr.3. p.167-174.
- [17] **Dulen, G. - Schröder, K.:** Roboter-Kalibration durch Abstandsmessungen. Robotersysteme, 1991. Nr.7. p.33-36.
- [18] **Engelberger, J. F.:** Industrieroboter. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1980. p.268.
- [19] **Frank, P. M.:** Fehlerfrüherkennung für Roboter unter Verwendung dynamischer Prozeßmodelle. Automatisierungstechnik. 1991. Nr.11. p.402-408.
- [20] **Freund, E. - Hoyer, H.:** Regelung und Bahnbestimmung in Mehrrobotersystemen. Automatisierungstechnik. 1988. Nr.10. p. 389-407.
- [21] **Feuser, A.:** Geregelte, ventilsteuerte Linear- und Rotationsantriebe. O+P Ölhydraulik und Pneumatik. 1988. Nr.5. p. 346-354.
- [22] **Gerke, W.:** Kollisionsfreie Bewegungsführung von Industrierobotern. Automatisierungstechnik. 1985. Nr. 5. p. 135-139.
- [23] **Geering, H. P. - Guzzella, L. - Hepner, S. A. - Ibner, C. H.:** Time-optimal motions of robots in assembly tasks. IEEE Trans. Autom. Contr. 1986. Nr. 6. p. 512-518.
- [24] **Good, M. C. - Sweet, L. M. - Strobell, K. L.:** Dynamic models for control systemdesign of integrated robot and drive systems. Trans. ASME. J. Dyn. Syst. Meas. and Contr. 1985. Nr. 1. p. 53-59.
- [25] **Graf, B.:** Flächenoptimale Belegung von Flachmagazinen für die Handhabungstechnik. Robotersysteme, 1986. Nr. 2. p. 83-89.
- [26] **Helm, L. :** Ipari Robotok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983. p. 168.
- [27] **Heiß, H.:** Grundlagen der Koordinatentransformation bei Industrierobotern. Robotersysteme, 1986. Nr. 2. p. 65-67.
- [28] **Hornung, B.:** Simulation paralleler Robotprozesse. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, ect. 1990. p.146.

- [29] **Jakobi, W.:** Industrieroboter schon ausreichend flexibel für den Anwender. Industrieroboter International. 1986. Nr.5. p.273-277.
- [30] **Jain, C. L. - Fukuda, T.:** Soft Computing for Intelligent Robotic Systems. Physica Verlag Heidelberg, New-York, 1998. p. 238.
- [31] **Jacubasch, H. - Kuntze, H. B.:** Anwendung eines neuen Verfahrens zur schnellen und robusten Positionsregelung von Industrierobotern. Robotssysteme, 1987. Nr.3. p.129-138.
- [32] **Kalny, R. - Vlasek, M.:** Continuous path control of non simple robots. Robotssysteme. 1991. Nr.7. p.65-67.
- [33] **Kessler, G.:** Einfluß und Kompensation von Lose und Coulombscher Reibung bei einem drehzahl - und lagegeregelten, elastischen Zweimassensystem. Automatisierungstechnik. 1989. Nr. 1. p.23-31.
- [34] **Kulcsár, B.:** Alkatrészkezelő megoldásokat tervező számítógépi program az oktatásban. Gépípari automatizálás az oktatásban Konferencia Kiadványa II. köt. 385 p. Budapest, 1989.
- [35] **Kulcsár, B.:** Robotok vizsgálatára alkalmas laboratórium a Gépípari és Automatizálási Műszaki Főiskolán. A robotvizsgálatokkal szerzett tapasztalatok. Gépípari automatizálás az oktatásban Konferencia Kiadványa II. köt. 234 p. Budapest, 1989.
- [36] **Kulcsár, B.:** Ipari robotok dinamikus pályapontossága. Gépípari és Automatizálási Műszaki Főiskola Közleményei. Kecskemét, X. évf.(1991-1992.) 103-118 p.
- [37] **Kulcsár, B.:** Dynamische Bahngenauigkeit von Industrierobotern. Elektrotechnik und Informationstechnik (**e & I**) 111. Jg. (1994) H6. 294-298 p.
- [38] **Kulcsár, B.:** Ipari robotok hajtórendszerének tervezési szempontjai a pontossági követelmények figyelembevételével. GÉP XLVI. évf. 1994. 7. 30 -37 p.
- [39] **Kulcsár, B.:** Ipari robotok hajtórendszerének szabályozása becsült paraméterek alapján. GÉP XLVI. évf. 1994. 10-11. 42-45 p.
- [40] **Kulcsár, B.:** Robotkarok tömegkiegyenlítése. GÉP XLVI. évf. 1994. 10-11. 46-48 p.
- [41] **Kulcsár, B.:** Munkahelyek robotos kiszolgálása. TEMPUS JEP 06215 - 93/1. 125 p. Budapest, 1994.
- [42] **Kulcsár, B.:** Robottechnika. Előadásvázlat. Gábor Dénes Műszaki Informatikai Főiskola Budapest, 1995. 117 p.

- [43] **Kulcsár, B.:** A BME Építő- és Anyagmozgató Gépek Tanszék, automatizált logisztikai- és anyagmozgatási laboratóriumának felépítése és oktatási lehetőségei. GÉP 1996. 6. 5 - 8 p.
- [44] **Kulcsár, B.:** Ipari robot vizsgáló laboratórium és robot oktatóbázis kialakítása. Vizsgálati programok kidolgozása. Kutatási jelentés A/2-4-31/84 OKKT témáról. Kecskemét, 1985. 118 p.
- [45] **Kulcsár, B.:** Kísérleti robot oktatóbázis kialakítása. TR-4022 tip. festőrobot vizsgálata. Kutatási jelentés G/6-10.018 OKKT témáról. Kecskemét, 1989. 5 p.
- [46] **Kulcsár, B.:** Kísérleti robot oktatóbázis kialakítása. TR-4022 tip. festőrobot dinamikai, kinematikai és pontossági vizsgálata. Kutatási jelentés G/6-10.018 OKKT témáról. Kecskemét, 1989. 13 p.
- [47] **Kulcsár, B.:** Alkatrészekelő megoldásokat tervező számítógépi program kidolgozása. Kutatási jelentés a BAKONY MŰVEK részére. Kecskemét, 1986 49 p. Kutatási jelentés melléklete. Kecskemét, 1986. 64 p.
- [48] **Kulcsár, B.:** Automatikus munkahelyi anyagkezelő rendszerek számítógépes oktatóprogramjának fejlesztése. Kutatási zárójelentés az OMFB 7-15-0873 sz. témáról. Kecskemét, 1990. 82 p.
- [49] **Kulcsár, B.:** Robot oktató laboratórium. (Oktatórobot programozása). FMFA kutatási jelentés. Kecskemét, 1991. 52 p.
- [50] **Kulcsár, B.:** Robotvizsgálatok továbbfejlesztése. (Kinematikai geometriai, dinamikai és erőtan vizsgálatok.). FMFA (témaszám: 212/1990) kutatási jelentés. Kecskemét, 1991. 32 p.
- [51] **Kulcsár, B.:** Drive-Technical Relations of New Robot-Construction principles. Előadás: MICROCAD Miskolc, 2000. február p. 23-24.
- [52] **Kulcsár, B.:** Robotok modellezése és pályapontosságának kapcsolata. Előadás: MICROCAD '93. Miskolc, 1993. márc. 3.
- [53] **Kulcsár, B.:** Robotkarok tömegkiegyensúlyozásának hatása a mozgató csuklónyomatékokra. Előadás: MICROCAD '93. Miskolc, 1993.márc. 3.
- [54] **Kulcsár, B.:** Az anyagmozgató és logisztikai berendezésekkel és rendszerekkel kapcsolatos oktató- és kutatómunka. Előadás: Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszékek találkozója. Sopron, 1993. november 18 - 19.

- [55] **Kulcsár, B.:** Gépek dinamikai tulajdonságainak és irányítórendszerének összefüggései automatizált anyagmozgató rendszerekben. Előadás: MICROCAD '94. Miskolc, 1994. március 3.
- [56] **Kuntze, H. B. - Jacubasch, H. - Franke, M. - Salaba, M. - Becker, P.J.:** Sensorgesützte Programmierung und Steuerung von Industrierobotern. Robotersysteme. 1988. Nr.4. p.43-52.
- [57] **Lantos, B.:** Robotok irányítása. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991. p.35.
- [58] **Langmann, R.I.:** Meßsysteme zur Lage- und Positionsbestimmung bei Industrierobotern. Feingerätetechnik, 1985. Nr. 2. p. 551-554.
- [59] **Lotze, V.:** Genauigkeit und Prüfung von Koordinatenmeßgeräten. Feingerätetechnik. Berlin. 1986. 8. p. 339-342.
- [60] **Mahalingam, S. - Sharan, A. :** The Nonlinear Displacement Analysis of Robotic Manipulators using the complex Optimization Method. Mech.Nach.Theory. 1987.. Vol. 22. Nr. 1. p.89-95.
- [61] **Mármárosi, I. - Kulcsár, B.:** Planning of an Automated Guided Vehicles Laser-Navigating System Using Beacon Selection and Continuous Observation. Előadás: MICROCAD Miskolc, 1999. február 24-25. (Közlésre elfogadva).
- [62] **Mullineux, G.:** Use of Nonlinearities in Determining Robot Manipulator Positions. Mech. Mach. Theory. 1985. Vol.20. 5. p. 439-447.
- [63] **McKerrow, P. J.:** Introduction to Robotics.. Addison - Wesley Publishing Company, Sydney, Wokingham, England, ect. 1990. p. 811.
- [64] **Nof, Y. S.:** Handbook of Industrial Robotics. John Wiley & Sons, New-York, Chichester, ect. 1985. p. 1358.
- [65] **Pham, D. T. - Heginbotham, W. B.:** Robot Grippers. IFS (Publications) Ltd. UK. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg ect. 1986. p.443.
- [66] **Pennywitt, K.:** Robotic Tactile Sensing. Robotics.. BYTE 1986. 1. p.177-200.
- [67] **Ránky, P. - Ho, C. Y.:** Robot Modelling. Control and Applications with Software. IFS (Publication) Ltd. UK. Springer Verlag, Berlin, New-York ect. 1985. p.361.
- [68] **Paul, R. P.:** Robot Manipulators. Mathematics Programming, and Control. The MIT Press. Cambridge, London, England. 1981. p.279.
- [69] **Peters, K.:** Fehlerkompensation an Industrierobotern. Industrie. Anzeiger. 1985. N.15. p.30-31.

- [70] **Pritschow, G. - Koch, T.:** Digitale Lageregelung von Industrieroboter Bewegungsachsen. Robotersysteme. Springer Verlag, 1988. Nr.4. p.65-72.
- [71] **Pritschow, G. - Koch, T. - Bauder, M.:** Automatisierte Erstellung von Rückwärtstransformationen für Industrieroboter unter Anwendung eines optimierten iterativen Lösungsverfahrens. Robotersysteme. Springer – Verlag, 1989. Nr. 5. p. 3-8.
- [72] **Pritschow, G. - Frager, O. - Schumacher, H. - Weieland, H.:** Programmierung von roboterbeschickten Produktionsanlagen. Robotersysteme, Springer - Verlag, 1989. Nr.5. p.47-56.
- [73] **Rácz, K.:** UAM-1500 típusú A/D kártyával felvett időjelek feldolgozása (robot vizsgálat). BME Építő- és Anyagmozgató-gépek Tanszék. Oktatási segédlet. Budapest. 1995. p. 15.
- [74] **Reddig, M. - Stelzer, J.:** Iterative Methoden der Koordinatentransformation am Beispiel eines 6-Achsen-Gelenkroboters mit Winkelhand. Robotersysteme. Springer-Verlag, 1986. Nr. 2. p.138-142.
- [75] **Rüdiger, W.:** Photogrammetrie. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1973. p.432.
- [76] **Sályi, I.(jr.):** Mechanizmusok. Tankönyvkiadó, Budapest, 1973. p. 514.
- [77] **Sándor, Gy.:** Térbeli mechanizmusok elágazásmentes szintézise. GÉP. 1987. 3. p. 82-85.
- [78] **Schneider, A. J.:** Steuerung von Robotern mit Krafrückkopplung. Maschinenbautechnik, 1982. N.4. P.160-163.
- [79] **Schüßler, H. H.:** Neue Möglichkeiten des Laser-Einsatzes in der Industriellen Messe-technik. Messen und Überwachen, 1989. N.4. P.4-14.
- [80] **Schwinn, W.:** Mehrdeutigkeiten der inversen kinematischen Transformation. Robotersysteme, Springer - Verlag, 1989. N.5. p.29-39.
- [81] **Scott, J. H. - Nagel, R. N. - Roberts, R. - Odrey, N.G.:** Multiple Robotics Manipulators. Robotics. 1986. BYTE. N.1. p.203-216.
- [82] **Shapiro, L. G. - Haralick, F. M.:** Computer and Robot Vision. Vol. I. Addison - Wesley Publishing Company. Inc. 1992. p.672.
- [83] **Shapiro, L.G. - Haralick, R.M.:** Computer and Robot Vision. Vol.II. Addison - Wesley Publishing Company, Inc. 1992. p.630.
- [84] **Shirai, Y. – Hirose, S.:** Robotics Research. The Eight International Symposium. Springer Verlag, Berlin, London, Heidelberg ect. 1998. p. 450.



- [85] **Shoureshi, R. - Corless, M. J. - Roesler, M.D.:** Control of Industrialmanipulators with bounden uncertainties. Trans. ASME. J. Dyn. Syst. Meas. and Contr. 1987. Nr. 1. p.53-59.
- [86] **Sokollik, F. - Brack, G.:** Hierarchische Steuerungen zur oparativen Lenkung Großer Systeme. MSR. Berlin, 1984. Nr. 5. p.194-196.
- [87] **Somló, J. - Lantos, B. - Cat, P. T.:** Advanced Robot Control. Akadémiai Kiadó. Budapesat, 1997. p. 425.
- [88] **Sóvári, J. - Kulcsár, B.:** Dynamic and Automatic Simulation of Rack Strackers. Előadás: MICROCAD Miskolc, 1999. február 24-25.
- [89] **Spong, W. M. - Vidyasagar, M.:** Robot Dynamics and Control. John Wiley & Sons, New-York, ect. 1989. p.336.
- [90] **Spong, M. W. - Vidyasagar, M.:** Robust linear compensator design for nonlinear robotic control. IEEE. Int. Conf. Rob. and Autom. St.Luis, Mo. March. 25-28. 1985. Silver Spring. 1985. 954-959.
- [91] **Stadler, W.:** Analytical Robotics and Mechatronics. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering. 1995. p. 570.
- [92] **Stepien, T. M. - Sweet, L. M. - Good, M. C. - Tomizuka, M.:** Control of tool/workpiececontact force with application to robotic deburring. IEEE.J. Rob. and Autom. 1987. Nr. 1. p. 7-18.
- [93] **Tersch, H.:** Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Industrie-robotern. Robotersysteme. 1988. Nr. 5. p.153-156.
- [94] **Tönshoff, H. K. - Harmut, J. - Gerstmann, U.:** Robotergenauigkeit. Wartungen der Anwender und Realisierbarkeit. VDI. 132. 1990. Nr. 6. p. 93-97.
- [95] **Volmer, J.:** Industrieroboter Entwicklung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1983. p. 378.
- [96] **Vukobratovic, M. – Kircanski, N.:** Real-Time Dynamics and CAD of Manipulation Robots. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 1985. p. 239.
- [97] **Vukobratovic, M. – Potkonjak, V.:** Applied dynamics and CAD of manipulation robots. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 1985. p. 305.
- [98] **Walter, W. - Rojek, P.:** Mehrgrößenregelung mit Signalprozessoren. Sonder-Publikation Roboter. Elektronik. 1984. Nr. 10. p. 109-111.

- [99] **Wadhwa, S. - Browne, J.:** Analysis of collision avoidance in multi-robot cells using Petri nets. Robotersysteme. Springer - Verlag, 1988. Nr. 4. p. 107-115.
- [100] **Wadle, M. - Cramer, M.:** Umwelterfassung und modellgestützte Kollisionsdetektion bei hochflexiblen Handhabungsgeräten. Robotersysteme. Springer - Verlag, 1989. Nr.4. p. 9-16.
- [101] **Warnecke, H. J. - Frankenhauser, B.:** Montage von Schläuchen mit Industrierobotern. Robotersysteme, Springer - Verlag. 1988. Nr. 4. p. 93-105.
- [102] **Warnecke, H.J. - Schhraft, R.D.:** Industrial Robots. Application Experience. IFS Publications Ltd. 35-39 High Street, Kempston, Bedford MK 42 7BT, England. 1982. p. 289.
- [103] **Wauer, J.:** Symbolische Generierung der Bewegungsgleichungen hybrider Roboter systeme. Robotersysteme. Springer - Verlag. 1986. Nr. 2. p. 143-148.
- [104] **Wilson, M.:** Robot position sensing and performance testing. Measurement + Control. 1987. Nr. 6. p. 69-73.
- [105] **Wloka, W. D.:** Robotersimulation. Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991. p. 327.
- [106] **Wloka, D. W.:** Roboter Systeme I. Technische Grundlagen.. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London, Paris Tokyo Hong Kong, Barcelona, Budapest, 1992. p. 271.
- [107] **Zheng, Y. F. - Heimamai, H.:** Computation of multibody system dynamics by a multiprocessor scheme. IEEE. Trans. Syst. Manuf. and Cybern. 1986. Nr. 1. 102-110.