

Kulcsár Béla

Robottechnika



A könyv megjelenését a Nemzeti Kulturális Alap támogatta.



Nemzeti Kulturális Alap

© Prof. Dr. Kulcsár Béla, Typotex, 2012

Lektorálta: dr. Filemon Józsefné, egyetemi magántanár

ISBN 978 963 279 669 7

Témakör: *műszaki tudományok*

Kedves Olvasó!

Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!

Újabb kiadványainkról, akcióinkról

a www.typotex.hu és a [facebook.com/typotexkiado](https://www.facebook.com/typotexkiado)

oldalakon értesülhet.



Kiadja a Typotex Elektronikus Kiadó Kft.

Felelős vezető: Votisky Zsuzsa

Felelős szerkesztő: Serfőző Sarolta

Műszaki szerkesztő: Csépany Gergely

Borítóterv: Tóth Norbert

Készült a Kódex Könyvgyártó Kft. nyomdájában

Felelős vezető: Marosi Attila

Tartalomjegyzék

Bevezetés	9
1. A robotok kialakulásának áttekintése	11
2. A robotok kialakulásának tudományos, műszaki és társadalmi háttere (háttéranyag)	23
3. Robotok fogalmi meghatározása	27
3.1. Robotok funkcionális elemzése	28
3.1.1. Manipulátor	31
3.1.2. Teleoperátor	31
3.1.3. Helyezőberendezés	34
3.1.4. Ipari robotok	35
3.2. Robotok csoportosítása	37
3.3. Ellenőrző kérdések	39
4. Robotok felépítése	43
4.1. Robotok mechanikai rendszerének koordináta-rendszerek szerinti felépítése, robotmechanikák	43
4.1.1. Derékszögű koordináta-rendszerű robot	43
4.1.2. Henger-koordináta-rendszerű robot (RTT)	46
4.1.3. Gömbi koordináta-rendszerű robot (RRT)	47
4.1.4. Csuklókaros robotok	49
4.1.5. Robotplatformok lineáris (transzlációs) mozgásokból	58
4.1.6. A robottechnika mechanizmuselméleti kérdései	64
4.2. Robotok munkatere	75
4.3. Robotkarok tömegkiegyenlítő rendszerei	103
4.3.1. Ellensúllyal való tömegkiegyenlítés	103

6 Tartalomjegyzék

4.3.2.	Rugós tömegkiegyenlítő mechanizmus	109
4.4.	Robotok hajtási rendszerei	116
4.4.1.	Pneumatikus hajtási rendszerek	119
4.4.2.	Hidraulikus hajtási rendszerek	121
4.4.3.	Villamos hajtási rendszerek	128
4.5.	Robotok megfogó szerkezetei	144
4.5.1.	Erőzáró megfogás	148
4.5.2.	Alakzáró megfogás	150
4.5.3.	Robotmozgás dinamikai jelenségei és a megfogó szerkezet megfogási biztonsága	156
4.5.4.	A megfogandó munkadarabok méretének hatása a megfogó szerszámközéppontjának helyzetére	163
4.5.5.	Egyéb megfogó szerkezetek	173
4.6.	Robotok szenzorikai elemei	174
4.6.1.	Belső szenzorok	177
4.6.2.	Külső szenzorok	186
4.7.	Mobil robotok felépítése és jellemzői	187
4.8.	Ellenőrző kérdések	194
5.	Robotok irányítórendszere	197
5.1.	Robotok belső adatfeldolgozásának struktúrája	197
5.2.	Koordinátatranszformációk	199
5.2.1.	Forgatás	200
5.2.2.	R-P-Y szögek	201
5.2.3.	Homogén transzformációk	202
5.2.4.	Denavit–Hartenberg-transzformáció	206
5.2.5.	Jakobi-mátrix	222
5.3.	Robotok dinamikai rendszere és mozgásegyenletei	227
5.3.1.	Tehetetlenségi tenzor	227
5.3.2.	Robotok mozgásegyenletei	230
5.3.3.	Robotok dinamikai modelljei	232
5.4.	A robotmozgás inverz feladata	244
5.5.	Hajtónyomatékok számítása aritmetikai processzorral	249
5.6.	PTP és CP irányítás	250
5.6.1.	PTP irányítás	252
5.6.2.	CP irányítás	253
5.7.	Számított hajtónyomatékok realizálása	256
5.8.	Robotok hajtásszabályozása	257
5.9.	Ellenőrző kérdések	265
6.	Robotok programozása	267
6.1.	Robotok pályagenerálása betanító és világ-koordinátarendszerben való programozás esetén	267
6.1.1.	Pályagenerálás betanító programozással	267

6.1.2.	Pályagenerálás világ-koordinátarendszerben	269
6.2.	A CP programozás elve betanító programozással	281
6.3.	A PTP programozás elve betanító programozás esetén	282
6.4.	Programszerkesztés betanító programozási rendszerekhez	282
6.5.	Programszerkesztés elvei világ-koordinátarendszerű programozási rendszerekben	283
6.6.	Ellenőrző kérdések	285
7.	Robotok alkalmazása	287
7.1.	Robotos anyagkezelő rendszerek	287
7.2.	Robotos technológiai rendszerek	291
7.2.1.	Gyártócellák	291
7.2.2.	Robotos festőrendszerek	292
7.2.3.	Robotos hegesztőrendszerek	294
7.2.4.	Robotos vágórendszerek	295
7.3.	Mobil robotos rendszerek	297
7.4.	Anyagkezelési és technológiai segédberendezések	298
7.5.	Robotok alkalmazása az orvosi technikában	304
7.6.	Ellenőrző kérdések	307
8.	Robotok vizsgálata	309
8.1.	Robotok vizsgálatának elvei, vizsgálati paraméterek	309
8.2.	Robotok pályakövetési pontosságának vizsgálata	310
8.3.	Robotok beállási pontosságának és ismétlőképességének vizsgálata	321
8.4.	Robotok munkatérvizsgálata	331
8.5.	A robotok egyéb jellemzőinek vizsgálata	339
8.5.1.	Mozgó tárgy követésének pontossága	339
8.5.2.	Legkisebb programozható lépés	341
8.5.3.	Merevségi vizsgálatok	342
8.5.4.	Zajvizsgálatok	343
8.6.	Ellenőrző kérdések	346
9.	Feladatok	347
	Irodalomjegyzék	361

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 eszközzrendszer a termelési folyamatok automatizálására fejlődött ki. Létrejöttét elősegítették a fejlett ipari államok ipari termelés volumenének növekedését akadályozó munkaerőgondok, a termelékenységi 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 MSc mesterképzésben részt vevő hallgatók is elegendő mélységű ismeretanyagot sajátíthatnak el.

A könyv a bevezetésen kívül nyolc fejezetre tagozódik. Az első fejezet a robotok kialakulását tekinti át. A második fejezet a robotok kialakulásának tudományos, műszaki és társadalmi háttérét 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 *robotok irányítórendszere* fejezet a robotok belső adatfeldolgozásának leképezését tárgyalja a programozott pályaadatoktól a csuklómozgatás szögelfordulás-adatainak realizálásához, figyelembe véve a nyomatékképzést és a hajtásszabályozást, illetve a perifériák működését és más irányítórendszerhez való illesztését. A *robotok programozása* fejezet azokat a programozástechnikai módszereket ismerteti, amelyek segítségével a robot által befutandó pályaadatok előállíthatók.

A *robotok alkalmazása* fejezet a robotok ipari és egyéb 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 és Gazdaságtudományi Egyetemen „*Robotok és vizsgálatuk*” címmel tartott előadásaim, az e téren végzett kutatásaim, illetve az LSI Oktatóközpont kiadásában *Robottechnika* című korábban kiadott könyvem képezik. A könyv korábbi kiadása – amit a magyar felsőoktatás széles körben használt – elfogyott, és szükségessé vált egy átdolgozott, felújított kiadás. 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. december

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. I. e. 1. sz.: *Heron* az „Automata színház” c. munkájában leírja egy mechanikus színház modelljét, amelyben kizárólag fogaskerekekkel, emelőkarokkal és csigákkal mozgatott bábuk szerepelnek. Az ötfelvonásos színdarab a trójai háború egy epizódját eleve-níti fel; miként állt bosszút *Naupliosz* a görögökön, akik megkövezték fiát, *Palamédész*t. Ugyancsak i. e. 1. sz.-ban Homéros az *Ilias*ban írt arról, hogyan igyekeztek az istenek képmást teremteni maguknak. Az emberutánczatok legismertebb példája Paracelsus (1493–1541) *Homunculusa*. A humunculus a középkori alkímisták tanítása szerint, tisztán kémiai eljárással, laborató-riumban 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 pergamenlapot tettek a szájába. A példák sorát zárjuk most Mary Shelley *Frankensteinjével* (1818).

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 (and-roidokat), amelyek önálló gondolkodásuk és cselekvésük révén az emberek



1.1. ábra

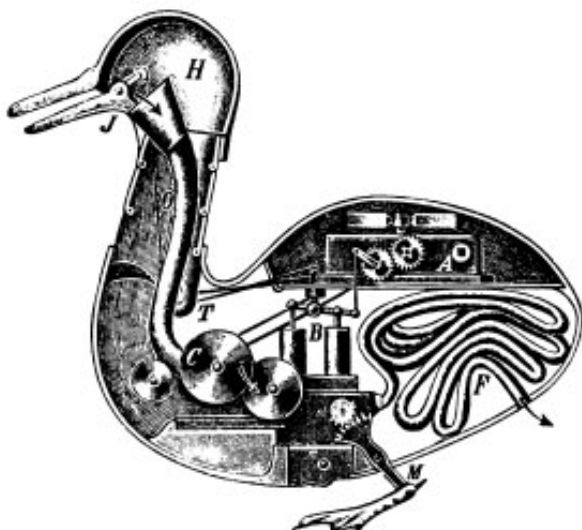
felett állnak. Szörnyeket, akik a világot uralják és az embert szolgáskorban tartják, nem utolsó sorban azért, mert a természet vagy más felső hatalom így fizet vissza az elkövetett vétkekért.

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 ujjaival meghatározott sorrendben váltogatta a hangszer billentyűit, és 11

különböző melódiát tudott eljátszani. 1738-ban készült el a második híres automataként a hápogó kacsca (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 bütykök segítségével különböző rajzokat tudott készíteni. Bár nem kapott az előző kettőhöz hasonló publicitást, itt kell megemlíteni a magyar *Kempelen Farkas* udvari tanácsos sakkautomatáját.

Kempelen Farkas valószínű, hogy a késő barokk kor embereinek az órákért és a felhúzható állat- és babafigurákért való lelkesedését használta ki. Maga a sakkautomata egy töröknek öltöztetett baba, amely keresztbe rakott lábakkal ül egy doboz formájú asztal előtt, amelyen a saktábla, rajta a sakkfigurákkal, helyezkedik el. A mozgásokat bonyolult kerékrendszerek és rudak továbbították, amelyet az asztal zárt rekeszében megbújt igazi

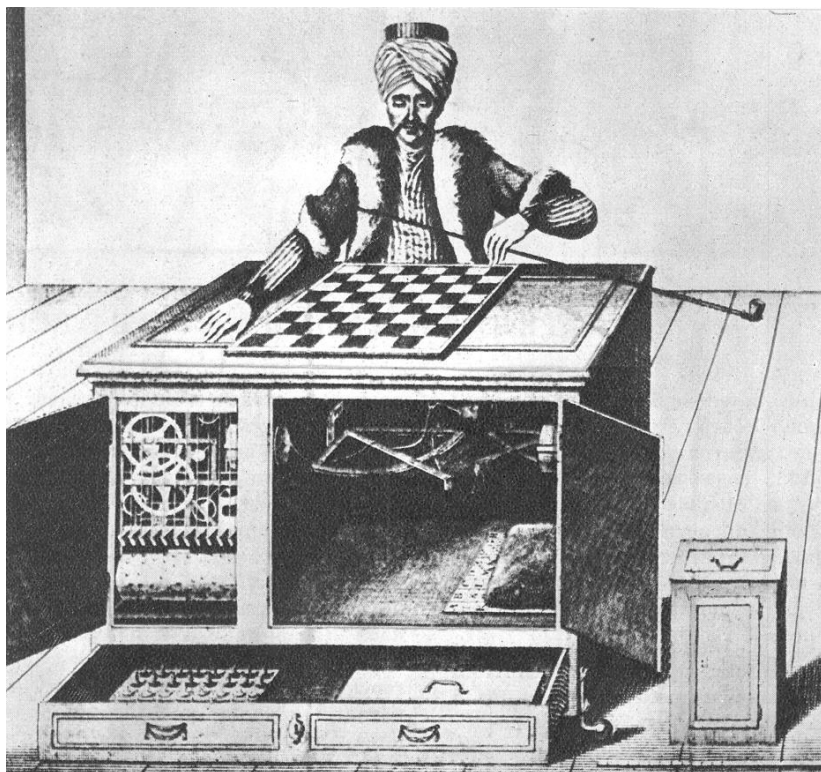


1.3. ábra

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).

Az automaták építése a 19. században is folytatódott. Ezek közé tartozik az 1805-ben *H. Millardet* által konstruált képet festő mechanikus baba. Emberformája volt *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 átlagemberé.

Láthatjuk tehát, hogy a robotok előfutárai már régen megvoltak, csak korábban nem sikerült a már megépített gépeket hasznos dolgokra alkalmazni. A tervezés tovább folyt, ha már sikerült egyes élőlények mozgását



1.4. ábra

gépekkel megvalósítani, miért ne sikerülhetne 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:

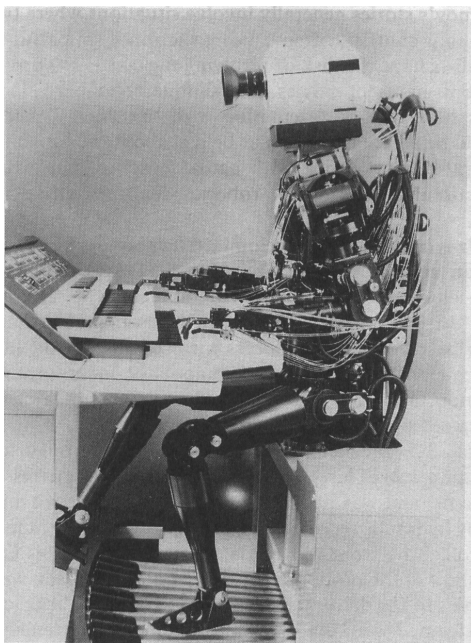
- 1946. G. C. Devol (1.5. ábra) kifejleszt egy villamos jelek feldolgozására alkalmas vezérlő berendezést, amelyet később mechanikus berendezések vezérléséhez alkalmaznak.



1.5. ábra

- 1951. *Goertz és Bergsland* kifejleszti a teleoperátort (amerikai szabadalom).
- 1954. *C. W. Kenwart* egy robotfejlesztési szabadalmat nyújt be (kétkaros, 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 robotprogramozási nyelvhez vezetett.
- 1974. Az ASEA bevezeti az Irb6 villamos hajtású robotot, a cincinnati Milacron cég pedig üzembe helyezi a T3 robotot.

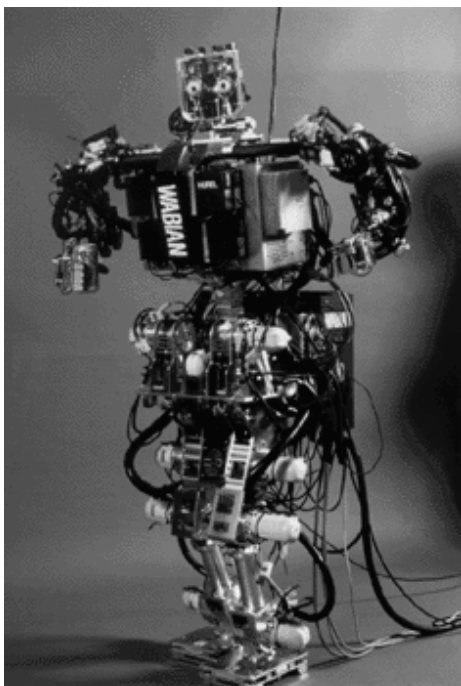
- 1975. Az első szerelési művelet Olivetti SIGMA robottal.
- 1976. A Charles Draper laboratóriumban kifejlesztik a rugalmas csuklót, szereléshez.
- 1978. Az Unimation PUMA sorozatának a bevezetése.
- 1979. A Yamanashi Egyetem kifejleszti a SCARA robotot.
- 1981. A robotok direkt hajtásának kifejlesztése a Carnegi–Mellon Egyetemen.
- 1984. A Waseda Egyetemen kifejlesztik a WABOT-2 antropomorf robotot (1.6. ábra).



1.6. ábra

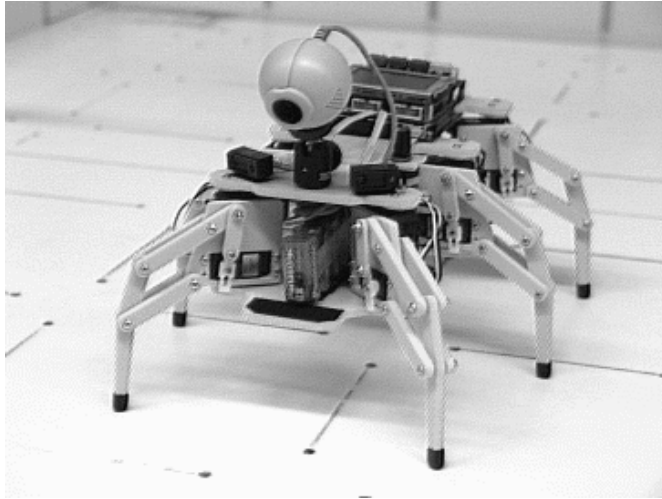
- 1985. Világméretben elkezdődik az autonóm mobil robotok és a harcászati robotok fejlesztése. Megjelenik a robotok harmadik generációja.
- 1995. Megjelennek a különböző robot platformok, ezek között – jelentőségét tekintve – kiemelkedik az ún. párhuzamos robot.
- 1995. Megjelennek a különböző mozgásokat (főként emberi mozgásokat) leképező robotok, 1.7 és 1.8. ábrák.

- 1998-ban az Amerikai Egyesült Államokban szabadalmaztatják a robotok orvosi alkalmazását (US Patent 005762485A 1998. Jun. 9.) (1.9. ábra).

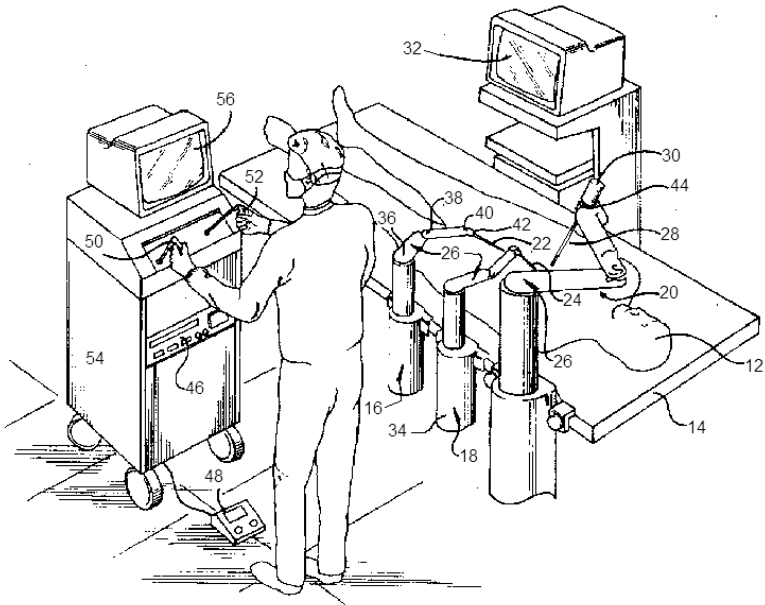


1.7. ábra

A fent leírtak azt mutatják, hogy a robottechnika egy interdiszciplináris tudománnyá vált, hiszen valamilyen gépi berendezés automatikus üzemmódban működik. Az automatikus működést általában programozható, irányítórendszerek biztosítják. Az irányítórendszerek 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 teremthetők 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



1.8. ábra



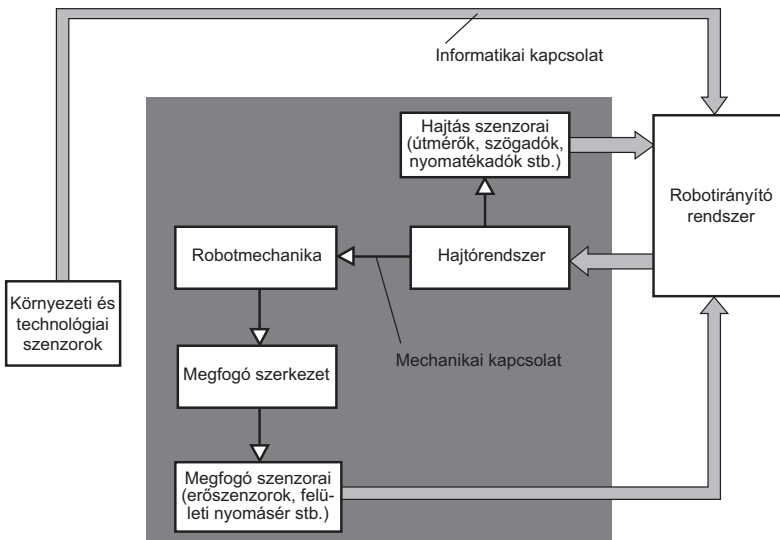
1.9. ábra

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 évben a SEF cég az ún. TRICEPT robottípusának megjelenésével forradalmasította a technológiát. A fejlesztés iránya ma is az, hogy a robot – intelligenciaszintjének 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 1.10. ábrán foglalható össze. Funkcionális egységeit tekintve az alábbi részekből áll:

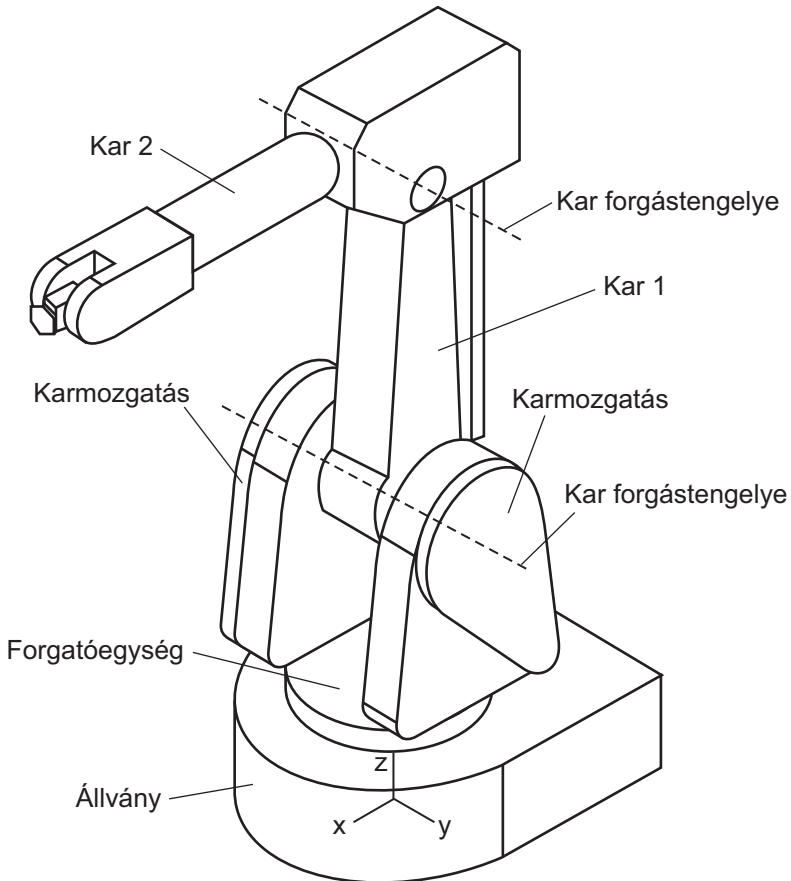
- robotmechanika,
- hajtóegység,
- robot megfogó szerkezete,
- szenzorikai elemek,
- irányítórendszer a szoftverekkel.



1.10. 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 1.11. ábra.

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



1.11. ábra