

Lázár Tamás - Nagy József

Robotkar elfordításához használt motortípusok összehasonlító vizsgálata

Tamás Lázár - József Nagy

A Comparative Study of the Motor Types Used for Rotating Robot Arms

Összefoglalás

Napjainkban elterjedten használják a robot manipulátorokat a műszaki élet minden területén. Ezen gépek legfőbb jellemzői a gyorsaság, a pontosság és a jó ismétlési képesség, s ezek fenntarthatósága a robot teljes működési élettartama alatt. Azonban nem biztos, hogy minden esetben szükség van eme bonyolult berendezésekre. Az itt bemutatott üzemi vizsgálatok alkalmasak más felépítésű, de ugyanilyen feladatot végrehajtó gépek egyes működési tulajdonságainak összehasonlítására s ezáltal egy géptípus vagy konstrukció kiválasztására. Jelen publikációban bemutatom az ipari robotoknál legáltalánosabban használt két motortípus működési elvét és azok legfontosabb paramétereit üzemi vizsgálatokon keresztül.

Kulcsszavak: Puma robot, pontosság, ismételhetőség, felbontás, léptető és szervó motor

Summary

Nowadays robotic manipulators have been widely used in all fields of engineering. The main features of these machines are speed, accuracy and a good repetition capability, and their sustainability over the entire operating life of robots. However, it is not sure that such complex equipment is always required. The operational tests presented here are suitable to compare the operating features of each machine with a different structure but executing the same tasks and thereby to select a machine type or construction. In this publication I present the operating principle of the two most commonly used industrial robot motors and their most important parameters through operational tests.

Keywords: PUMA robot, accuracy, repeatability, resolution, stepper & servomotor

1. CÉLKITŰZÉS

A kutatási téma keretében céloom olyan irányelvek meghatározása, melyek segítségével egyszerűen kiválasztható az adott elvárásoknak megfelelő pozícionáló rendszer és annak elemei. Illetve eldönthető, hogy feltétlenül szükséges és célszerű-e egy robot manipulátort üzembe helyezni vagy más egyszerűbb

alternatívák is szóba jöhetnek a konkrét munkafolyamat végrehajtására.

Ennek megfelelően a kutatás célját a következő üzemi paraméterek vizsgálatként foglalhatom össze:

- -pontosság,
- -ismételhetőség,
- -felbontás.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

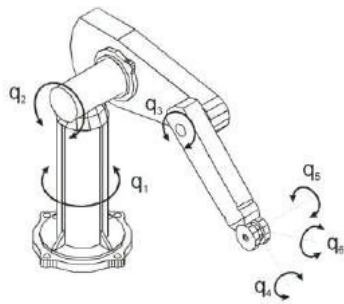
2.1. Robot manipulátor vizsgálatai

Fő munkaminőségi paraméterek

A robotok legfőbb üzemi paramétereit a gyártók minden esetben megadják, de azokban csak a laboratóriumi vizsgálatok végső eredményei láthatóak. Adott egy robot ismétlési képessége számszerűen, de annak változását nem mutatják be. Nem, vagy csak ritkán adnak meg grafikonokat, melyek szemléltetni tudják a beállási képességet, például a terhelés tömegének arányában, de legalább ilyen fontos az abszolút sebesség, illetve a működés közben megtett út hosszának befolyásoló hatása is.

A későbbiekben bemutatott vizsgálatok egy Staubli RX-130-as roboton történtek, mely felépítése alapján a PUMA robotok közé sorolható. A robot manipulátor rögzített alapzatától kiindulva az első 3 csukló a robot alapkonfigurációjához tartozik (három rotációs csukló, három szabadságfokkal q_1 , q_2 és q_3), a robot effektor pedig újabb három rotációs csuklót tartalmaz q_4 , q_5 és q_6 [1]:

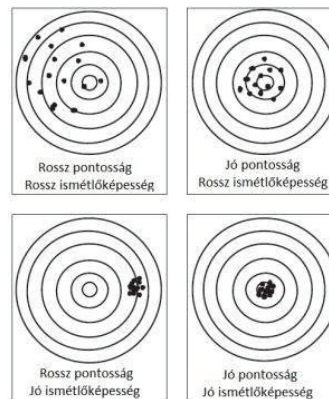
1. ábra: Puma rendszerű robot manipulátor



Az effektor nincs részletezve az ábrán, de a beállási pontosságra nézve ennek a résznek a jelentősége jóval kisebb, mint az alapkonfigurációé. Az első három csukló adja

meg a fő pozíciót, az effektor pedig az ezen pont körüli szóródást [2].

2. ábra: Pontosság – Ismételhetőség



A berendezés legfőbb üzemi paramétereit - pontosság, ismételhetőség és felbontás - rendkívül sok környezeti és gépi tényező befolyásolja. Mindezek a [2] számú szakirodalomban szemléletesen, egy úgynevezett hibafában összefoglalva megtalálhatóak. Ezen túlmenően fontos szerepet tölt be a légellenállás, a berendezés műszaki állapota és legfőképp az effektorra épített megfogó szerkezet kialakítása is.

Világkoordináták meghatározása

A csuklókoordináták transzformálása világkoordinátákba a Denavit–Hartenberg féle transzformációs mátrixszal történik [3]. Az eljárás lényege az, hogy egy koordináta-rendszer két haladó és két forgó mozgással egy másikba átvihető. A robot manipulátoroknál használt Denavit–Hartenberg paraméterek: d , a távolságok és a , q szögek.

A D–H paraméterek a következők[4]:

d_i : minden csuklótengelynek két normálisa van (a_{i-1} és a_i) és a normálisok közötti az i -edik csukló z_{i-1} tengelye mentén mért távolság a d_i ,

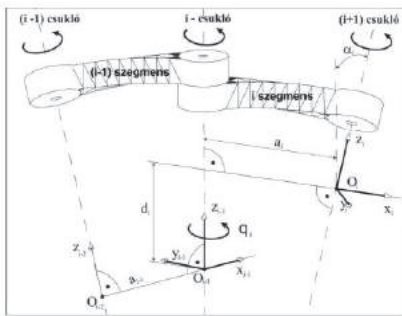
a_i : i -edik és $i+1$ -edik csukló-tengelyek közös normálisának a hossza az x_i tengelyen mérve,

α_i : i -edik csukló z_{i-1} és az $i+1$ -edik csukló z_i tengelye közötti jobbsavar irányú szög az a_i -re

merőleges síkban.

q_i : csuklókoordináta, rotációs csukló esetében az x_{i-1} és x_i tengelyek között bezárt jobbsavar irányú szög nagysága [1].

3. ábra: Derékszögű koordinátarendszerek helyzete a Denavit-Hartenberg eljárás szerint és a q_i forgatás



Denavit–Hartenberg-eljárás szerint felvitt két szomszédos derékszögű koordinátarendszer $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ és $O_ix_iy_iz_i$ két haladó és két forgó mozgással egymásba átvihető.

Ezt az eljárást levezetve megkapjuk a transzformációs mátrixot a két egymást követő rotációs csuklóra rögzített koordinátarendszer esetén[1]:

$${}^{i-1}D_i = \begin{bmatrix} \cos q_i & -\sin q_i \cos \alpha_i & \sin q_i \sin \alpha_i & a_i \cos q_i \\ \sin q_i & \cos q_i \cos \alpha_i & -\cos q_i \sin \alpha_i & a_i \sin q_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ha minden egymást követő koordinátarendszer esetén meghatározzuk a D-H transzformációs mátrixot, akkor a robot manipulátor platformjához kötött álló koordinátarendszer és

az effektorhoz kötött mozgó koordinátarendszer közötti D-H féle homogén transzformációs mátrixot, a két egymást követő koordinátarendszerek D-H mátrixainak szorzata adja.

$${}^0T_n = {}^0D_1 {}^1D_2 {}^2D_3 \dots {}^{n-2}D_{n-1} {}^{n-1}D_n$$

A robot manipulátor csuklók összes D-H mátrixának összeszorzásával megkapjuk azt a mátrixot, mely megadja az effektor szerszámközpontjának a pozícióját és az effektor orientációját. Ha a robotmanipulátor-csuklóknál rögzítjük a megfelelő koordinátarendszereket és meghatározzuk a D-H paramétereket:

$$\alpha_i, a_i, d_i, q_i \quad (i=1,2,\dots,n),$$

akkor a homogén transzformációs-mátrixok csak a csuklókoordináták q_i függvényeivé válnak. Tehát ha a robotmanipulátornál meghatározzuk a mátrix numerikus alakját, akkor abból kiolvashatjuk az:

- az effektor szerszámközpontjának a pozícióját és a
- három módosított Euler szöveget, így tulajdonképpen meghatározzuk a robot manipulátor világkoordinátáit.

$${}^0T_n = \begin{bmatrix} & & & x \\ & {}^0R_n & & y \\ & & & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ezen tényezők tökéletes meghatározása alapvető fontosságú s a legnagyobb befolyással bír a robot manipulátor pontosságára nézve.

Az ismétlési képesség vizsgálata

A pontosságot és az ismétlési képességét az európai és az amerikai szabványok a következőképpen határozzák meg [5]:

Valóságos pozíciók: X_{ai}, Y_{ai}, Z_{ai} Beállított, elvárt pozíciók: X_c, Y_c, Z_c

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ai}, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{ai}, \quad \bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{ai}$$

$$l_i = \sqrt{(X_{ai} - \bar{X})^2 + (Y_{ai} - \bar{Y})^2 + (Z_{ai} - \bar{Z})^2}$$

$$\bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i, \quad S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (l_i - \bar{l})^2}{N - 1}}$$

ISO 9283

Pontosság:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{X} - X_C)^2 + (\bar{Y} - Y_C)^2 + (\bar{Z} - Z_C)^2}$$

Ismétlőképesség:

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l$$

ANSI/RIA R15.05-1

Átlagos pontosság:

$$\bar{d}_{PA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(X_{ai} - X_C)^2 + (Y_{ai} - Y_C)^2 + (Z_{ai} - Z_C)^2}$$

Ismétlőképesség:

$$\bar{r}_{REP} = \bar{l}$$

A méréseket az ISO szabvány figyelembevételével végeztük el, s a gyártó által kiadott specifikációval hasonlítottuk össze.

1. táblázat: Staubli RX sorozat ismétlési képessége[6]

Robot Típus	Ismétlési érték	
	mm	inch
RX 130	0,035	0,00138
RX 90	0,025	0,00098
RX 60	0,015	0,00059

Az üzemi vizsgálatokat 20-25°C-os környezeti hőmérséklet és normál páratartalom mellett végeztük 8 órán keresztül. A robot közel 2500-szor állt be a lerakási pozícióba 22 különböző felvételi helyzetből indulva. A terhelés nem változott, de egy külön mérés során megvizsgáltuk ennek a hatását is. Az effektorra

egy speciális kialakítású pneumatikus megfogó szerkezet volt szerelve, mellyel feltehető a gyártósorra az előlap illetve behelyezhető a kijelző. A munkadarab pontos pozícióját 3 lézer interferométerrel vizsgáltuk, majd a fentebbi képletekkel összegeztük. Az eredmények kiértékelése a MiniTab nevű statisztikai programmal történt.

2-2. Léptető és szervó motor vizsgálatai

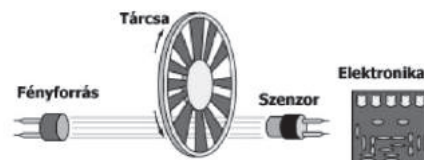
A vizsgálat során felhasznált eszközök működésének ismertetése

Pozíció érzékelés inkrementális encoder-rel:

Az encoder olyan jeladó, amely egy tengely elfordulását érzékeli és az elfordulás szögével arányosan valamilyen elektromos jelet szolgáltat (4. ábra). A jeladó tengelyére rögzített tárcsa átlátszó, amelyre különböző helyzetekben nem átlátszó alakzatokat visznek fel. A tárcsa egyik oldalán fényforrás, a másikon fényérzékelő elem helyezkedik el. A tárcsa forgásakor a fényérzékelő elemre hol érkezik fény, hol nem. A vevő részében ennek megfelelő elektromos jel jön létre[8].

Az inkrementális (növekményes) jeladóban olyan tárcsa van, amelyiken egyforma távolságra egyforma méretű sávok vannak. A sávokat két darab optikai kapu figyeli, amelyek úgy helyezkednek el, hogy egymáshoz képest 90 fokkal eltolt fázisú jelet szolgáltatnak a tárcsa forgásakor. Ez a két jel az "A" és a "B" fázis. Az optikai kapuk jelét beépített elektronika alakítja szabványos jellé.

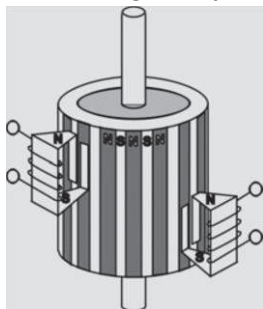
4. ábra: Inkrementális encoder elvi felépítése



Állandó mágnesű léptetőmotor:

Az állandó mágnesű motor váltakozva északi és déli pólusokra felmágnesezett forgórészsel rendelkezik, állórésze tekerceslt (5. ábra). A mágneses forgórészpólusok intenzív mágneses teret hoznak létre, ezáltal a forgatónyomaték lényegesen nagyobb, mint például lágyvasas forgórész esetén.

5. ábra: Állandó mágnesű léptetőmotor

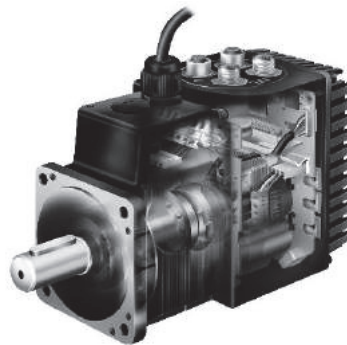


AC szervo motor:

Szervo mechanizmusnak olyan rendszert hívunk, amely negatív visszacsatolású hibaérzékelő megoldást használ a mechanizmus megfelelő teljesítményének elérése érdekében, de csak akkor nevezünk igazából szervónak egy rendszert, ha az a fent említett hiba korrekációs rendszer segítségével képes szabályozni a mechanikai pozícióját is[9].

Az AC szervók általában alapvetően két-fázisú, reverzibilis, indukciós motorok, szervo működésre átalakítva (6. ábra). Az AC szervo motorokat főleg olyan helyen alkalmazzák, ahol fontos, hogy a motor gyors, nagy pontosságú karakterisztikákkal rendelkezzen. Hogy eleget tudjanak tenni ezen követelményeknek, az AC szervo motoroknak kis átmérőjű, nagy ellenállású rotorjaik vannak. A kis átmérő kis tehetetlenségi nyomatékot biztosít, a gyors indulás, megállás, irányváltás érdekében. A magas ellenállásérték pedig majdnem teljesen lineáris sebesség-nyomaték karakterisztikát eredményez, mely növeli a motor pontosságát.

6. ábra: AC szervo motor



Vizsgálati módszer

A két motortípust egy automata csavarozógép szállítószalagján hasonlítottam össze. A berendezés két legfőbb üzemi paraméterének vizsgálatát, a pontosságot és az ismétlődőképességet a már korábban említett robotokra vonatkozó európai szabványok alapján végeztem.

Ez a vizsgálati módszer biztosítja, hogy az általunk kapott eredmények összehasonlíthatóak legyenek a hasonló feladatokat ellátó, de más típusú manipulátorok üzemi vizsgálatának eredményeivel is.

Az üzemi vizsgálatokat 20-25°C-os környezeti hőmérséklet és normál páratartalom mellett végeztük 8 órán keresztül. A berendezés több mint 3800-szor állt be az elvárt pozícióba. A terhelést az első mérés idejére állandósítottuk, azaz a gyártott modell nem változott, a második mérés során pedig megvizsgáltuk a terhelés hatását is. A munkadarab pontos pozícióját lézer interferométerrel vizsgáltuk.

A mérés során egy Omron E6C2-CWZ6C-360 2M típusú enkóderből, egy Rockwell CSMT-02BB1ANT3 szervo motorból és CSD3-02BX2 motorvezérlőből álló rendszert hasonlítottunk össze az eredetileg használt, ugyancsak 200W névleges teljesítményű Rockwell léptetőmotorral.

3. A VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

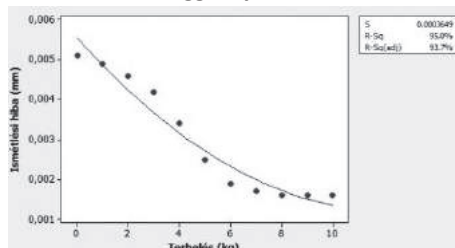
3.1 Robot manipulátor vizsgálatok

Ismétlési képesség a terhelés függvényében

A robotot 0-tól 10kg azaz a maximális terhelésig vizsgáltuk 1kg-os lépcsőnként. A sebesség a maximum 30%-a volt minden esetben.

Regresszió analízissel vizsgáltuk, hogy van-e kapcsolat a két érték között, majd függvényillesztéssel meghatároztuk az átviteli összefüggést.

1. diagram: Ismétlési hiba a terhelés függvényében



Tehát a változást leíró egyenlet:

$$IH_m = 0,00555 - 0,000714m + 0,000029m^2,$$

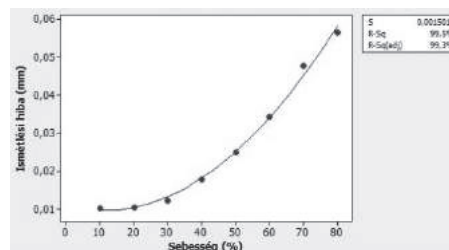
ahol m a terhelés nagysága kg-ban. Az egyenlet illeszkedése pedig 95%.

Ismétlési képesség az abszolút sebesség függvényében

Jelen esetben a vizsgált sebességet nem a robot csuklóinak sebességéből, hanem a teljes folyamat időbeni lefolyásából, vagyis a gép ciklusidejéből határoztuk meg. 100%-nak vettük azt a sebességet, ahol még a mozgatott munkadarabok 4/5-e nem mozdult el a megfogó szerkezetben. A sebesség növelése ugyan a rotációs csuklók elfordulásának gyorsításával történt, de oly módon, hogy a ciklusidő csökkenjen lineárisan, vagyis a csuklók sebességének változtatása nem volt egyenlő.

A 100%-ot elérve, bármely csukló további szögsebesség-növelése már a folyamat hibáját okozta volna.

2. diagram: Ismétlési hiba az abszolút sebesség függvényében



A sebességet továbbnövelve a mozgatott munkadarab néhány esetben a saját tehetetlensége miatt elmozdul a megfogó szerkezetben, s ezáltal kimagaslóan nagy hibák keletkeznek, illetve a hibaanalízisből ezeket az eredményeket ki kell zárni.

Az ismétlési hiba a sebesség függvényében a következő:

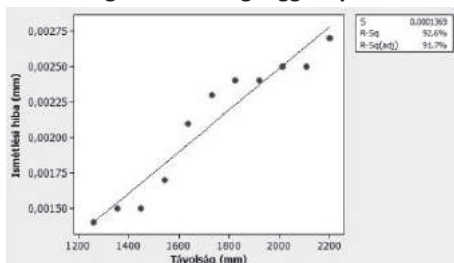
$$IH_v = 0,01092 - 0,000223v + 0,00001v^2,$$

ahol v a sebesség %-os aránya.

Ismétlési képesség az abszolút mozgatási távolság függvényében

A robot manipulátor a munkafolyamat során két különböző tároló egységből, azokon belül pedig 11-11 különböző pozícióból veszi ki az alkatrészeket, de a lerakási koordináták mindig állandóak. A tapasztalatok szerint, ha nagyobb távolságról érkezik a munkadarab, akkor nagyobb a pozícionálási hiba is, ami pedig ellentmond a gyári specifikációnak. A legtávolabbi mozgatni kívánt egység 2,2m, a legközelebbi pedig 1,26m-re volt a lerakási pozíciótól.

3. diagram: Ismétlési hiba az abszolút mozgatási távolság függvényében



Az ismétlési hiba a mozgatási távolság függvényében a következő:

$$IH_s = 0,000452 - 0,000001s,$$

ahol s a mozgatási távolság mm-ben aránya.

KÖVETKEZTETÉSEK:

- Az első vizsgálat eredménye alapján kimondható, hogy a terhelés és az ismétlési képesség között kapcsolat áll fenn, mely az RX 130-as modellnél a mozgatott tömeg arányában négyzetesen csökkenő. Ez alátámasztja a [7] szakirodalomban fellelhető hasonló vizsgálatot illetve a két eredményből arra lehet következtetni, hogy ez egy géptípusonként változó, függvénnyel leírható jelenség.
- A második kísérletből látható, hogy a sebességet növelve az ismétlési hiba négyzetesen nő. Mivel az adatok nem pontosan a gép specifikációjában feltüntetett értékek, hanem arra épülő kapcsolt mennyiségek, ezért csak összehasonlító jelleggel lehet figyelembe venni ezeket.
- A harmadik mérés alapján van kapcsolat a mozgatási távolság és az ismétlési hiba között, bár a regresszió analízis alapján csak nagyon csekély mértékű. Egyes szakirodalmak alapján ez a rezgésre és

egyéb környezeti tényezőkre illetve a robot kopottságára vezethető vissza.

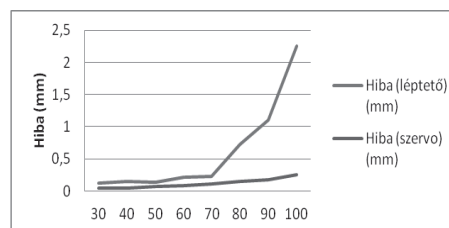
3.2 Léptető és szervo motor vizsgálatai

Ismétlési hiba a sebesség függvényében

A vizsgált sebességet a teljes folyamat időbeni lefolyásából, vagyis a munkadarab betöltési ciklusidejéből határoztuk meg. 100%-nak vettük azt a sebességet, ahol még a mozgatott munkadarabok 95%-a nem csúszik el a gumiszalagon. A sebesség növelése a léptető- illetve a szervo motorvezérlő segítségével történt, de oly módon, hogy a ciklusidő csökkenjen lineárisan. A 100%-ot meghaladva a motor sebességének növelése már a folyamat hibáját okozta volna.

A sebességet tovább növelve a mozgatott munkadarab néhány esetben a saját tehetetlensége miatt elmozdul a gumiszalagon s ezáltal kimagaslóan nagy hibák keletkeznek, illetve a hibaanalízisből ezeket az eredményeket ki kell zárni.

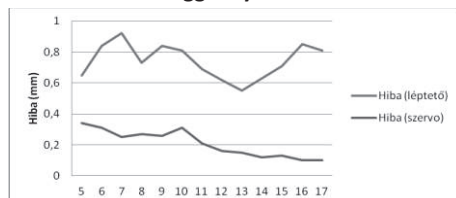
4. diagram: Ismétlési hiba a terhelés függvényében



Ismétlési hiba a terhelés függvényében

A berendezést 5-től 17kg terhelésig vizsgáltuk 1kg-os lépcsőnként. (Üzemi körülmények között a jelenleg gyártott legnagyobb modell súlya 17kg a legkisebb pedig 5kg.) A sebesség a maximum 80%-a volt minden esetben.

5. diagram: Ismétlési hiba a terhelés függvényében



KÖVETKEZTETÉSEK:

- Az első vizsgálat eredménye alapján kimondható, hogy a sebesség és az ismétlési hiba között kapcsolat áll fenn mindkét motortípus esetén. A szervo hajtásnál ugyan lényegesen kisebb mértékben, mint a léptető motor esetén, de megfigyelhető a sebesség

növekedésével arányosan a hiba növekedése is.

- A második mérés alapján a léptető motor esetén nincs egyértelmű kapcsolat a mozgatott tömeg és az ismétlési hiba között, de a szervo motorral kialakított esetben a kezdeti stagnálás után a tömeg növelésével a hiba csökken.

Mindezeket összegezve elmondható, hogy a vizsgált léptető motort csak akkor célszerű helyettesíteni szervo mechanizmussal, ha azt a mozgatási sebesség jelentős növelése miatti pontosság romlás feltétlenül szükségessé teszi, ugyanis ezen rendszer kialakítása lényegesen bonyolultabb.

IRODALOM

- [1.] Mester Gy.: (2011) Robotika, Typotex Kiadó, Szeged, 6 p., 20-22 pp., 25p., ISBN 978-963-279-515-7
- [2.] P.S. Shiakolas – K.L. Conrad – T.C. Yih: (2002) On the Accuracy, Repeatability and Degree of Influence of Kinematics Parameters for Industrial Robots, International Journal of Modelling and Simulation, Vol. 22, No. 3
http://iac.uta.edu/mars/mae4345/deg_influence_kin_params.pdf (2012-01)
- [3.] J. Denavit – R.S. Hartenberg: (1955) A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, Journal of Applied Mechanics Vol. 22, 215-221pp.
- [4.] A. Graser: (2009) Robotics I., University of Bremen, Institute of Automation
http://www.fb1.uni-bremen.de/~stugaet/wiki/images/c/ca/Robotics1_SS09.pdf (2011-12)
- [5.] N. G. Dagalakis: Industrial Robotics Standards, Chapter 27, National Institute of Standards and Technology, Intelligent Systems Division, Gaithersburg, Maryland, USA
<http://www.isd.mel.nist.gov/documents/dagalakis/nofchapter.pdf> (2011-11)
- [6.] RX Robots, Staubli Corporation (1998)
- [7.] Ahmad R. I., Azmi H., Syamimi S., Mohd Z. N., Shahrum A., Hairunnisa M. I.: (2008) The Repeatability Analysis of Industrial Robot under Loaded Conditions and Various Distances, 8th WSEAS Int. Conf. on ROBOTICS, CONTROL and MANUFACTURING TECHNOLOGY (ROCOM '08), Hangzhou, China, ISBN: 978-960-6766-51-0
- [8.] Zalotay Péter: Programozható irányítások II., Budapesti Műszaki Főiskola Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

- [9.] Erdélyi Viktor Ferenc: Szervomotorok, és azok jeladói (2011)
- [10.] Lukács Attila, Langer Ingrid: Elektrotechnika, Különleges motorok, Budapesti Műszaki Főiskola Bánky Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar, Mechatronikai és Autótechnikai Intézet
- [11.] Zsufa Attila: Villamos hajtások és mozgásvezérlők – 4. rész, Magyar Elektronika 2006/10