

Moduláris felépítésű, robotkarokban univerzálisan használható, nagy teljesítménysűrűségű precíziós hajtásrendszer kifejlesztése a K.K.K. 99 Kft.-nél

Development of a precision drive unit at K.K.K. 99 Kft. to be universally used as robot joints with high powerdensity and modular construction

Dr. KRISCH Róbert ügyvezető, *GÖNCFALVI Balázs* projektvezető

Wavedrive Kft., 9500 Celldömölk, Nagy Sándor tér 1., +36 30 989 9860, info@wavedrive.hu, www.wavedrive.hu

Abstract

A highly innovative gear unit set has been developed and manufactured to be widely used in medical industry, manufacturing robots or high precision manipulators. The main elements of the drive unit is the gear ratio reducing strain wave gear, the torque-motor and the force-torque measuring sensor which can be combined arbitrarily. In one unit the motor series size can be given but its power output (longer motor) and the gear reduction ratio can be varied. Assembling these parts, the result of this RnD project is a high precision drive with minimal dimensions which in itself is able to position rotating movement precisely and while at halt it also can keep that position with high torsional stiffness. Making the modular precision drive unit whole is the controlling system. The abovementioned machine elements can be assembled into different configurations so it can become part of a SCARA, humanoid or Delta robot. As a result of this project, the created precision drive prototypes could provide tests results which may influence the mechatronic and mechanical engineering profession. The development project was sponsored by the Ministry of Innovation and Technology.

Keywords: research and development, high precision, strain wave gear

Kivonat

Jelen projekt keretei között innovatív kísérleti hajtásrendszerek kerültek kialakításra, amelyek széles körben alkalmazhatók az orvostechnika, gyártástechnológia és robotika területén. A hajtásrendszerek főbb elemeit nagy áttétel megvalósítására alkalmas hullámhajtóművek, kompakt nyomatékmotorok, valamint hattengelyes erő-nyomaték mérő szenzorok alkotják, amelyek igény szerint tetszőlegesen kombinálhatók. Az elemek kombinációiból a kutatás-fejlesztési projekt keretei között több olyan kompakt, precíziós hajtásrendszer is összeszerelésre kerül, amelyek igen nagy teljesítménysűrűségűek, és egyúttal képesek nagy pontosságú forgó mozgás megvalósítására, valamint magas torziós merevségük által pozíciójuk megtartására. A hajtásrendszerek szerves részét képezi a projekt keretei között kifejlesztett egyedi vezérlőrendszer. A felsorolt elemek konfigurációiból összeállított hajtásrendszerek különféle SCARA, humanoid, vagy delta elrendezésű robotok csuklópontjaiba is beépíthetők. A fejlesztési folyamat részét képezi az elkészült precíziós hajtásrendszerek tesztelése, amelynek eredményeképp számos hasznos tapasztalattal gazdagodhat a mechatronikai és gépészmérnöki szakma. A projekt a Mikro- és kisvállalkozások innovációs tevékenységének támogatása révén a Nemzetgazdasági Minisztérium támogatásával jöhetett létre.

Kulcsszavak: kutatás-fejlesztés, precíziós hajtás, hullámhajtómű

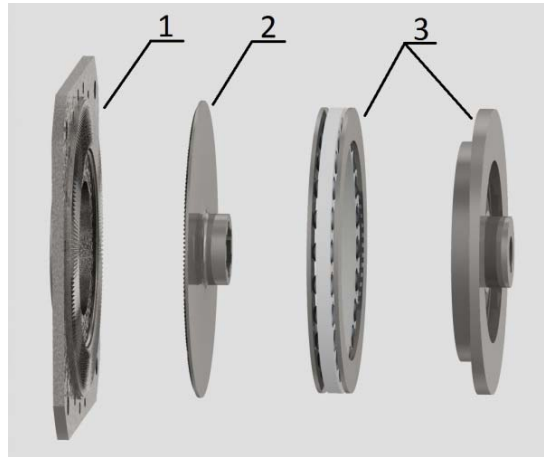
1. Bevezetés

A K.K.K. 99 Kft. a 2018-1.1.1-MKI-2018-00152 azonosító számú pályázat keretében támogatást nyert olyan széles körben alkalmazható precíziós hajtásrendszerek megtervezésére és prototípusaik legyártására, amelyek orvostechnikai és ipari robotok, manipulátorok, valamint nagy pontosságot igénylő mozgásokat megvalósító rendszerek hajtásaként szolgálhatnak. Jelen cikk több kísérleti hajtásrendszer felépítését és

tulajdonságait ismerteti, kezdve a pontos konfigurációtól, egészen az elvégzett tesztek leírásáig és az eredmények kiértékeléséig. A főbb típusok összevetését követően összefoglalásként bemutatásra kerülnek a tesztek során szerzett tapasztalatok.

2. A hullámhajtóművek működése

A hullámhajtóművek nagy áttételű, holtjátékmentes, nagy teljesítménysűrűségű precíziós hajtóművek, amelyek az 1. ábrán látható négy alapelemből állnak [5]. A behajtó oldalon forgó mozgást végző, bütyökfelülettel ellátott hullámgenerátor (4) egy rugalmas gördülőelemen keresztül (3) deformálja a szintén rugalmas hullámkeréket (2), amely ezáltal a merev kerékkel (1) kapcsolódik. A fogosztás mindkét fogazott elemnél azonos, azonban hullámkeréken a generátor bütyökszámaival kevesebb fogat munkálnak ki. Az alapelemek minden esetben koaxiálisak, így nem lép fel a ciklohajtóműveknél tapasztalható dinamikai kiegyensúlyozatlanság, amely a behajtó tengely fordulatszámát korlátozná.



1. ábra. A síkkerekes hullámhajtómű alapelemei: merev kerék (1), hullámkerék (2), rugalmas csapágy és bütykös hullámgenerátor (3) [3]

A hullámhajtóművek eltérő kialakításúak lehetnek. Az iparban szinte csak a hengeres merev és hullámkerékkel szerelt, ún. hengeres kerekes verzió terjedt el [1], létezik azonban sík kerekes változat is [4], amelynél a bütyökfelület ill. a hullám- és merev kerék fogai is egy-egy tárcsa homlokfelületén kerülnek kialakításra. A hullámkerék deformációja itt axiális irányú.



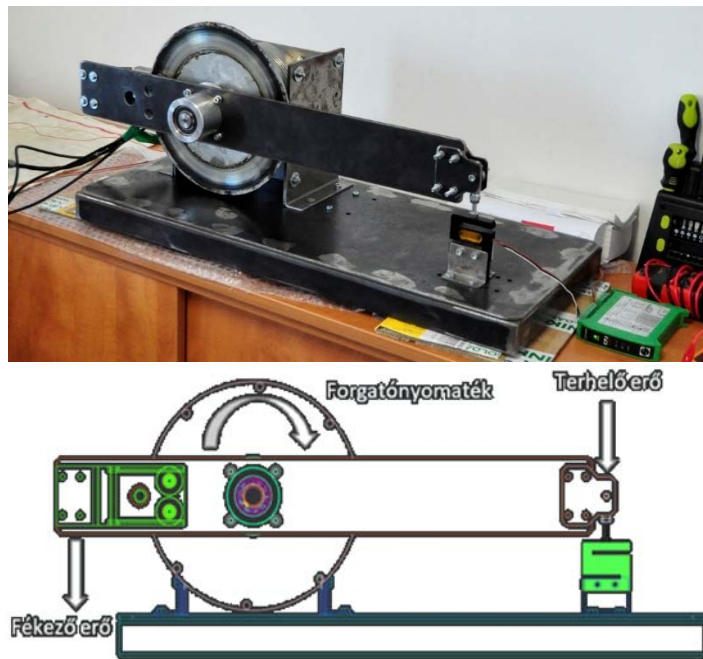
2. ábra. Kísérleti hengeres- és síkkerekes hullámhajtásrendszerek

Jelen pályázati projekt keretei között a 2. ábrán látható négy különböző hullámhajtómű készült el. Két sík-, valamint két hengeres kerekes verzió valósult meg, amelyek közül mindkét típusból összeszerelésre került egy fékes és egy fék nélküli változat. Az azonos típusú hajtóművekben egyes alkatrészek cserélhetők, így több konfiguráció kipróbálására lehetőség van. Ennek következtében például a hullámgenerátor bütyökfelülete, vagy a rugalmas csapágy gördülőelemei is eltérőek a különböző tesztek során [6].

3. Tesztkörnyezet és a felhasznált mérőeszközök bemutatása

A kísérleti hajtásrendszerek paramétereinek megismeréséhez specifikus tesztkörnyezet került kialakításra, valamint kiválasztottuk a megfelelő mérőműszereket. Ezek segítségével nyerhető ki az az adathalmaz, amely alapján a hajtásrendszerek tulajdonságai egymással és más konkurens termékekkel összevethetők.

Az elvégzett mérések két csoportra oszthatók. Elkészült a 3. ábrán látható mérőpad, amelyen a hajtóművek főbb paramétereit külön-külön vizsgálhatók. A berendezés lemezekből, illetve szelvényekből hegesztett masszív vázzal rendelkezik, amelyben a hajtásrendszerek acél féktárcsán és réz fékpofákon keresztül terhelhetők. Az eszközön helyet kapott egy nyúlásmérő bélyeggel ellátott erőmérő cella is, így a pillanatnyi terhelés is folyamatosan nyomon követhető. Az erőmérő egy jelerősítő eszközhöz van csatlakoztatva, a jel szűrése szoftveresen történik. A hajtásrendszerek jelét egy multifunkciós National Instruments USB-6212 adatgyűjtő kártya továbbítja a kiértékelő PC felé. További mérések történtek egy FLUKE Ti110 típusú kézi hőkamerával, valamint egy Agilent U1732 LCR mérőműszerrel. Utóbbi az egyes elektronikai eszközök fontosabb fizikai paramétereit (induktivitás, ellenállás, kapacitás) képes meghatározni.



3. ábra. Hajtásrendszer tesztelő próbapad

Az így összeállított mérési elrendezéssel hasznos információkat szerezhettünk többek között a különböző terhelési állapotokhoz tartozó áramfelvételtől, a fék és a hajtómű hőmérsékletének változásáról, a veszteségek mértékéről, valamint a hajtásrendszerek visszaállási pontosságáról.

Elkészült emellett egy egyedi manipulátor, amelyben az első csuklópontban egy síkkerekes-, a második és harmadik tengelyen pedig egy-egy hengeres kerekes hullámhajtóművel szerelt hajtásunk kapott helyet.

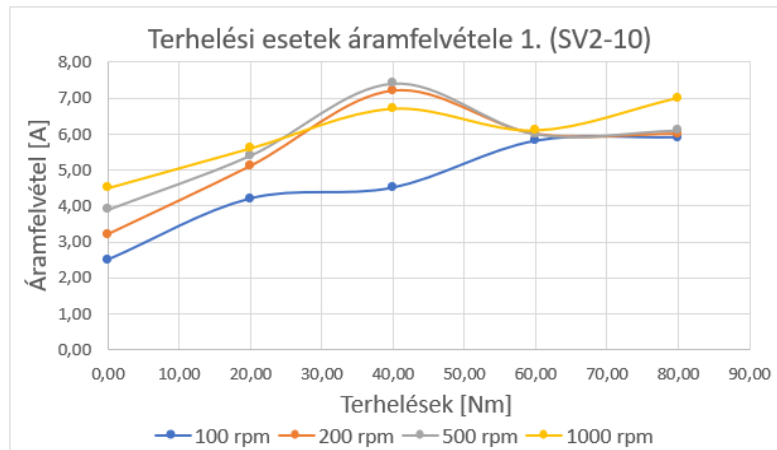


4. ábra. Hajtásrendszer tesztelő manipulátor

Ez a tesztkörnyezet leginkább egy SCARA robothoz hasonlítható, és különösen alkalmas az általunk fejlesztett precíziós hajtásrendszerek két típusának leggyakoribb alkalmazási területén, a robotikában előforduló terhelések és mozgásformák valóságos modelljének. A manipulátor segítségével további méréseket végezhetünk. Vizsgáltuk többek között a rendszer lehajlását, a karok és a hajtásrendszerek torziós merevségét, valamint a robot összetett pályák leírását követő visszaállási pontosságát.

4. Síkkerekes (SV2) hajtásrendszerek mérési eredményei

A méréseket a síkkerekes hajtóművel szerelt egységekkel kezdtük, ahol elsőként különböző terhelésen és fordulatszámokon vizsgáltuk az áramfelvételt. A kapott értékek a terhelés függvényében 2,5-7,5 [A] között ingadoztak. Az 5. ábrán jól látható, hogy a motor által felvett áram növekvő fordulatszám és terhelés esetén nő, azonban csak csökkenő mértékben.



5. ábra. SV2-10 hajtásrendszer áramfelvétele

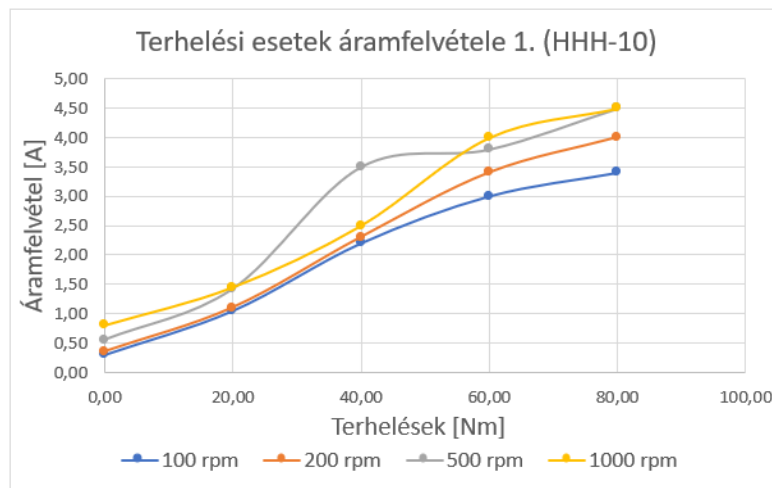
A vezérlőegység maximális terhelése, vagyis 10 [A] áram felvétele mellett 500 [1/min] fordulatszámon a fékkel szerelt hajtásrendszer 183 [Nm], míg a felépítésében nagyon hasonló, de fék nélküli verzió 175 [Nm] forgatónyomaték leadására volt képes, amelyek igen magas értékek ekkora befoglaló méretű hajtásokhoz viszonyítva. Belső hőmérséklet mérésére kizárólag a síkkerekes egységeknél van lehetőség, csak ezen típusok rendelkeznek beépített hőmérő szenzorral. Az elvárásoknak megfelelően mind a hőkamera, mind a szenzor az eltelt idővel arányosan növekvő hőmérsékletet jelezett.

Végül a hajtóművek visszaállási pontosságáról és torziós merevségéről is értékes adatokat gyűjtöttünk. A visszaállási pontosság ellenőrzéséhez 10,5 [m] távolságra vetítettük a mérőpad karjára erősített lézermutató jelét. A kart vízszintes helyzetből kitérítettük (60-90°), majd azonos értékkel visszairányítottuk, végül a falon lévő jelek eltérését leolvastuk. A kezdő- és végpont közötti eltérés alapján a hajtásrendszerek visszaállási pontossága 0,0055°. A kapott eredmények ellenőrzéséhez a kihajtó oldali enkóder jelét is vizsgáltuk, amely a fékes hajtóműnél 0,0035°, a fék nélkülinél 0,0036° eltérést mutatott.

Torziós merevség tekintetében az SV2-10 hajtóműnél 0,07 [arcmin/Nm] értéket kaptunk, 35 [Nm] maximális terhelés mellett. Ez az érték kimagasló a jelenleg elérhető precíziós hajtóművek között.

5. Hengeres kerekes (HHH) hajtásrendszerek mérési eredményei

A hengeres kerekes hajtásrendszerek egyik nagy előnye, hogy a hengeres rugalmas elem könnyebben deformálható, ezáltal kisebb erő hat a gördülő elemekre, mint a sík tárcsa esetében. Ezt az üzem közben tapasztalt alacsonyabb, 0,3-4,5 [A] közötti áramfelvétel értékek és a jobb mechanikai hatásfok is alátámasztotta.

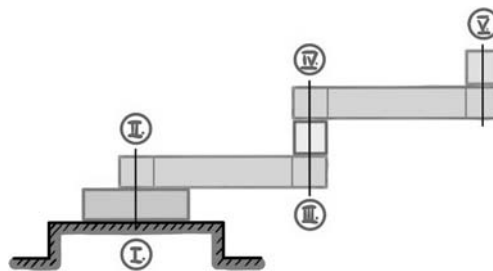


6. ábra. HHH-10 hajtásrendszer áramfelvétele

A kisebb veszteségek miatt a hajtóműház hőmérsékletének emelkedése is csekély, a legmagasabb hőmérséklet a kezdeti ingadozást követően $27\text{ [}^\circ\text{C]}$ alatt marad. Ezen hajtóművek visszaállása a lézeres mérések alapján hasonló, a kihajtó oldali enkóder szerint viszont $0,0044^\circ$ körüli, így tehát néhány ezred fokkal pontatlanabb, mint síkkerekes társaiké.

6. Robotkaron végzett mérések

A kísérleti manipulátor karon három fontos mérést végeztünk el. Beszerelésre került egy OnRobot HEX-H hattengelyes erő/nyomaték szenzor, amelynek köszönhetően nagy pontossággal, valós időben voltak kirajzolhatóak a robotot érő erőhatások.



7. ábra. Kísérleti robotkar kitüntetett pontjai

Elsőként a manipulátor lehajlását vizsgáltuk a 7. ábrán látható kitüntetett pontokban. Az eredmények azt mutatták, hogy az I-II. pontban lévő síkkerekes hajtómű deformációja lényegesen kisebb, mint a két kar között lévő hengeres kerekes egységé.

Teszteket végeztünk a csuklópontok, valamint a teljes rendszer torziós merevségének megállapítására, amelyhez a robot egységes oldalirányú terhelésére volt szükség. A hattengelyes szenzor segítségével rögzíthetők, majd normálhatóak voltak a terhelésekhez tartozó elmozdulások.

Végül ellenőriztük, hogy a robot összetett pályák leírását követően mekkora pontossággal képes a kijelölt pontra visszatérni. Ehhez a vezérlőben meghatároztunk egy pályát, majd a lehajlásnál és torziós merevség mérésénél alkalmazott lézeres jelöléssel megfigyeltük, hogy egy, illetve két ciklust követően mekkora eltérést tapasztalunk.

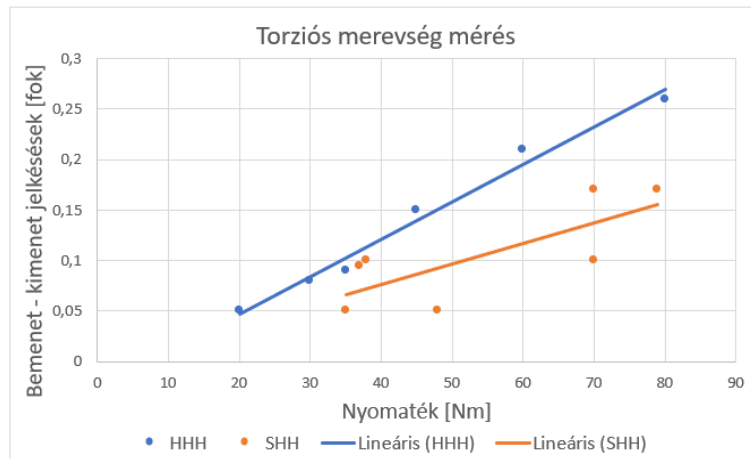
7. Eredmények értékelése, összehasonlítása

A vizsgálatok elvégzését követően összehasonlításra kerültek a mérési eredmények. Fontos megjegyezni, hogy a szervomotorok LCR műszerrel mért induktivitás és rezisztencia értékei mind a négy hajtásrendszerénél eltértek a katalógusban megadottaktól, a méréseket ezek alapján korrigáltuk.

A síkkerekes hajtásrendszerek működése láthatóan stabil, hiszen esetükben folyamatos terhelés mellett konstans áramfelvételt tapasztaltunk, azonban a terhelés növelésével fajlagos áramfelvételük csökkent, így az is megállapítható, hogy a síkkerekes hajtómű üzemeltetése alacsony terhelés mellett kevésbé gazdaságos. A

síkkerekes egységek torziós merevsége nagyobb, visszaállási pontosságuk pedig $0,0035^\circ$, amellyel robusztusabbnak és pontosabbnak bizonyultak, mint hengeres kerekes társaik.

A hengeres kerekes hullámhajtóművel szerelt egységek indítási nyomatéka alacsony, a terhelés növelésével pedig meredeken nő az áramfelvétel, amely arra enged következtetni, hogy ezen hajtóművek főként alacsony terhelésen működtethetők gazdaságosan. Torziós merevségük a rugalmas elem kialakításából adódóan kisebb, visszaállási pontosságuk pedig $0,0044^\circ$, ezáltal valamivel kevésbé pontosak, mint a síkkerekes hajtóművek. A 8. ábrán jól látható, hogy a terhelés növelésével mekkora volt a sík- és hengeres kerekes hajtóműveknél tapasztalt szögeltérés. Fontos azonban megjegyezni, hogy a kapott visszaállási pontosság és torziós merevség értékek mindkét esetben igen jónak számítanak a konkurens termékekhez viszonyítva.



8. ábra. Sík- és hengeres kerekes hajtásrendszerek különböző terhelésen vett szögeltérése

A kísérleti manipulátoron végzett mérések azt mutatják, hogy a hajtásrendszerek összetett szerkezetük miatt nagyobb mértékben deformálódtak, mint a robot karjai, azonban a lehajlás kinyújtott állapotban továbbra is igen kis mértékű. A torziós merevség tekintetében is hasonló következtetések voltak levonhatók. Különösen jó eredményeket kaptunk a robot visszaállási pontosságának mérésénél, ugyanis a manipulátor két teljes ciklus lefuttatása után is $0,05^\circ$ -os pontossággal állt vissza a kiindulási pozícióba.

8. Összefoglalás

A K.K.K. 99 Kft. által kifejlesztett precíziós hullámhajtómű egységeken elvégzett tesztek és mérések eredményei alapján elmondható, hogy a robotkar és a hajtásrendszerek a várt paramétereknek megfelelően működtek, igazodnak a precíziós alkalmazásokhoz. A projekt során szerzett tapasztalatok és következtetések alapján jövőbeli terveink között szerepel a hajtóművek további finomhangolása, valamint egy hajtásrendszer termécsalád összeállítása.

Irodalmi hivatkozások

- [1] www.harmonic-drive.com
- [2] Krisch R.: Síkkerekes hullámhajtó-művek fejlesztése, PhD értekezés, BME, 2010.
- [3] Kardos Sz., Krisch R.: Síkkerekes hullámhajtómű alapelemeinek optimalálása GÉP 2015/6. pp. 65-68.
- [4] Szavinüh A.G., Gurjanov M. Ja., Szavinüh V.M.: Parametriceszkiy rjad torcovüh volnovüh reduktorov, Vesztnyik Masinosztroenija, 1986(1), 7-9. o.
- [5] Musser C. W. : Strain Wave Gearing, United States Letters 1955. No. 2906143 és No. 2931248.
- [6] Yague-spaude E., Gonzalez-perez I., Fuentes-aznar A.: Stress analysis of strain wave gear drives with four different geometries of wave generator. *Meccanica*, 2020(55), 2285-2304. o.