

Integrált vezérlésű hajtásrendszerekből és kompozit karokból konfigurálható robotcsalád fejlesztése a Wavedrive Kft.-nél

Development of a Configurable Robot Family Using Integrated Drive Systems and Composite Arms at Wavedrive Kft.

KILLI Gábor² fejlesztőmérnök, Dr. FARKAS Zsolt¹ adjunktus, Dr. KRISCH Róbert² ügyvezető

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. +36 1 436 2354,
farkas.zsolt@gt3.bme.hu, www.gt3.bme.hu
²Wavedrive Kft., 9500 Celldömölk, Nagy Sándor tér 1.,
+36 30 989 9860, info@wavedrive.hu, www.wavedrive.hu

Abstract

The research and development project of Wavedrive Kft. focused on the development of a family of robots, with the primary goal of making the configurability, precision, and payload capacity of industrial robots used on production lines more widely available, including to smaller companies. The main mechanical components of the developed robots are robot joints consisting of compact, precision drive systems with integrated control, and robot arms manufactured using composite technology. This article aims to present the tests and research findings conducted on prototypes of the ConfigPRO modular robot family configured in 4-axis SCARA and 6-axis versions. The project was realized within the framework of the Economic Development and Innovation Operational Program, with support from the Ministry of National Economy and the European Union.

Keywords: robotics, research and development, wavedrive, composite technology, robot control

Kivonat

A Wavedrive Kft. kutatás-fejlesztési projektjének tárgya egy robot család kifejlesztése volt, amelynek elsődleges célja, hogy a gyártósorokon alkalmazott ipari robotok konfigurálhatóságát, pontosságát és teherbírását szélesebb körben, kisebb vállalatok számára is elérhetővé tegye. A kifejlesztett robotok fő mechanikus egységei az integrált vezérlésű, kompakt precíziós hajtásrendszerekből álló robotcsuklók és a kompozit technológiával előállított robotkarok. Jelen cikk a ConfigPRO moduláris robotcsalád 4 tengelyes SCARA illetve 6 tengelyes kivitelben konfigurált prototípusain végzett tesztek és kutatási tapasztalatokat hivatott bemutatni. A projekt a Gazdaságfejlesztési és Innovációs Operatív Program keretei között, a Nemzetgazdasági Minisztérium és az Európai Unió támogatásával jöhetett létre.

Kulcsszavak: robotika, kutatás-fejlesztés, hullámhajtómű, kompozit technológia, robotvezérlés

1. BEVEZETÉS

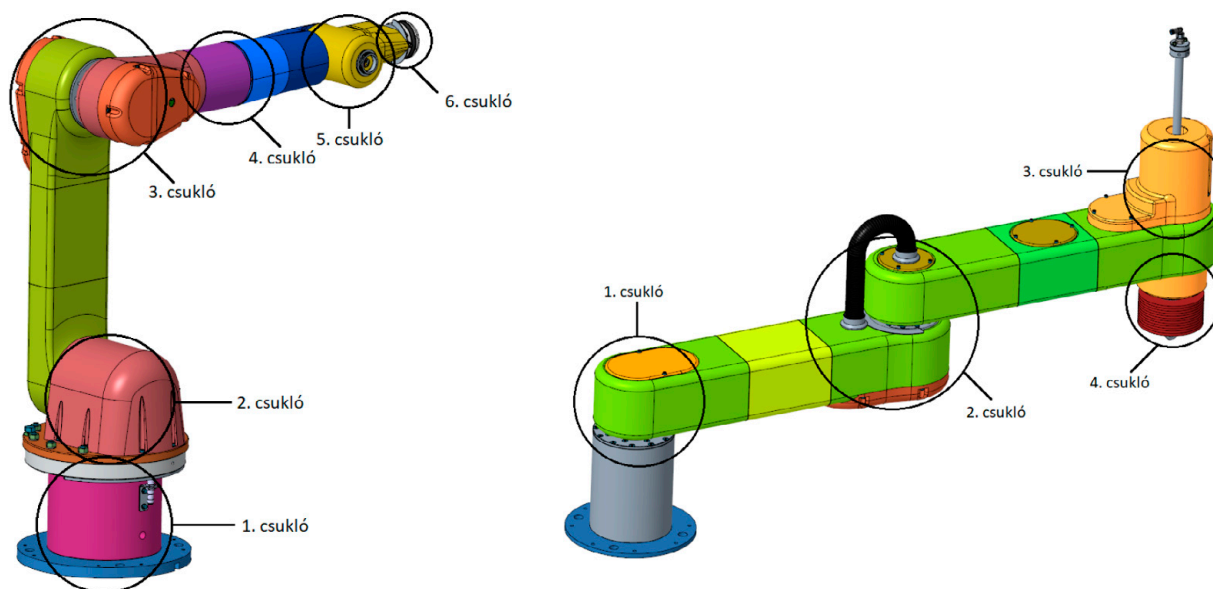
A Wavedrive Kft. a GINOP PLUSZ-2.1.1-21-2022-00015 sz. pályázat keretében támogatást nyert moduláris robotcsalád és annak tagjaiba épített integrált vezérlésű forgó csukló fejlesztésére. Célunk egy olyan termékcsalád megtervezése, gyártása és tesztelése volt, amelyek a jelenleg kapható ipari robotok alacsonyabb költségű, de automatizálástechnikai szempontból releváns versenytársaként szolgálnak. A projekt kivitelezése során nagy hangsúlyt kapott a különböző robotcsuklókba integrálható moduláris BLDC (kefe nélküli egyenáramú motor) vezérlőáramkör és egy szintén moduláris robot mozgásvezérlő kifejlesztése. Mechanikai oldalról a legfontosabb fejlesztési irány a robotcsalád beállási és visszaállási pontosságának maximalizálása volt, amelyet a karok hajlítómerevségének és a robotcsuklók torziómerevségének maximalizálásával értünk el. Jelen cikk a moduláris elemek és azok kombinálásából előállítható robot kifejlesztését mutatja be, egészen a tesztek elvégzéséig és kiértékeléséig.

2. A ROBOTCSALÁD FELÉPÍTÉSÉNEK ISMERTETÉSE

A ConfigPRO robotcsalád alapkonceptiója a modularitás, amely lehetővé teszi a robotok gyors adaptálását a specifikus ipari feladatokhoz. A rendszer két fő kinematikai struktúrára épül:

- GR6 sorozat: 6 szabadságfokú, humanoid jellegű robotkarok.
- GRS sorozat: 4 szabadságfokú SCARA, amely nagy sebességű precíziós mozgásra hivatott.

A modularitást egyrészt a kétféle (550 mm és 750 mm) szabványos karhossz, másrészt a rugalmasan integrálható csuklóponti hajtásrendszerek biztosítják, melyek kombinálásával 18 különböző GR6 és 12 különböző GRS robot konfiguráció hozható létre (1. ábra, 1. táblázat). A hajtásrendszerek tekintetében a projekt során négy különböző típust fejlesztettünk ki: három különböző méretű és teljesítményszintű hengerkeres hullámhajtóművet (HV7, HVC és HV4), valamint a hullámdifferenciál bolygóművet¹ (HDB). A vezérlési architektúra decentralizált: minden csukló egy PC-MD (Program and Communication - Motor Driver) panellel rendelkezik, amely 24V-os tápellátás mellett CAN-busz alapú kommunikációt valósít meg. A rendszer összehangolt működését a „PIA-BU” névre hallgató központi egység biztosítja. Ez a felépítés lehetővé teszi a robotkarok belső villamos kábelezésének jelentős csökkentését és a modularitás hardveres támogatását.



1. ábra. 6 tengelyes humanoid robotkar és SCARA felépítése

1. táblázat. A ConfigPRO robotcsalád csukló-hajtómű konfigurációs mátrixa

Csukló sorszama	6 tengelyes robot (GR6)	SCARA (GR6)
1	HV7 / HDB / HVC	HV7 / HDB
2	HV7	HV7 / HDB / HVC
3	HV7 / HDB / HVC	HVC alapú lineáris-torziós hajtás
4	HVC	HVC alapú lineáris-torziós hajtás
5	HVC	-
6	HV4	-

3. KUTATÁS -FEJLESZTÉSI FÁZISOK ISMERTETÉSE

A ConfigPRO projekt kutatási folyamata szekvenciális, egymásra épülő modulokból állt. Az első fázisban a hullám-differenciál bolygóművek (HDB) elvi kutatása és kinematikai modelljeinek felállítása történt meg, párhuzamosan a kompozit robotkarok geometriai előtervezésével. A második szakaszban a hajtáslánc-módosulatok numerikus szimulációja és a belső topológiai optimalizálás zajlott, beleértve a 3D nyomtatott sejt szerkezetű mag és a karbon-epoxi héj együttes viselkedésének vizsgálatát. A harmadik fázis az integrált vezérlőelektronika és a mozgásvezérlő szoftverkörnyezet – PC-MD panel és ROS-Industrial

architektúra (Robot Operating System) – fejlesztését és tesztelését foglalta magában. Végezetül a prototípusok összeszerelése után kiterjedt mérésorozattal validáltuk a rendszerek pontosságát, hatásfokát és dinamikai jellemzőit. A téma részletes leírata a pályázati dokumentációban⁴.

4. CSUKLÓPONTI HAJTÁSRENDSZEREK FEJLESZTÉSE

A csuklópontokban elhelyezett hajtásrendszer hajtáselvének kiválasztásakor alapvetés volt a holtjátékmentesség, melyet a hullámhajtás nagy precizitással, nagy nyomaték leadása mellett képes megvalósítani. A projekt keretein belül kifejlesztettük a 60-as áttételű HV4 továbbá a 120-as áttételű HV7 és HVC hengerkerekes fogaskerék hullámhajtóműveket. Annak érdekében, hogy játégmentes, de a hullámhajtóműveknél nagyobb sebességű mozgást hozunk létre, megalkottuk a hullámdifferenciál bolygóművet is. Az elkészült hajtásrendszerek sebesség-nyomaték görbéit, torziós merevségét és hatásfokát egy egyedi gyártású mérlegmotoros elvű tesztpadon mértük. A hullámhajtóművek üzemállapottól függően 63-86%-os hatásfokot értek el. Fejlesztés során vizsgáltuk a B+B (két belső kapcsolódású) és a KB+KB (két külső-belső kapcsolódású) konfigurációkat. Az előzetes számítások alapján elmondható, hogy az áttételek függvényében az elméletileg megvalósítható hatásfok 35% és 58% között alakul, míg a mérések alapján a maximális hatásfok 44% volt, mely a gyűrűkerék rugalmas alakváltozásából adódó kapcsolódási veszteségekkel magyarázhatók.

5. ROBOTKAROK MEREVSÉGI OPTIMÁLÁSA ÉS VALIDÁLÁSA

A robotkar fejlesztés első fázisában terhelés-peremfeltételi modellt állítottunk fel a legjobban terhelt karokra, és homogén izotróp 30 GPa-ra becsült rugalmassági modulusú anyaggal előterveztük őket. Az előtervezést követő optimalálás célfüggvénye a karok tömegének minimalizálása volt, 0,1 mm nagyságú lehajlási peremfeltétel mellett.

Hajlított próbatesteken diszkrét pontokban elvégzett szimulációkkal megállapításokat tettünk a szendvics szerkezetű kompozit paramétereinek érzékenységre a merevség növelés és tömegcsökkentés szempontjából. A vizsgált paraméterek a következők voltak:

1. Sejtmag cellaméret: meghatározza a magstruktúra sűrűségét.
2. Sejtmag cella falvastagság: döntő a nyomófeszültség és a nyíróerők elleni ellenállás szempontjából.
3. Sejtmag héj falvastagság: átmenetet képez a rácsszerkezet és a külső burkolat között.
4. Kompozit héj falvastagság: ez a réteg felelős elsősorban a hajlítómerevségért.

2. táblázat. Diszkrét pontos optimalálás során kiadódó topológiai paraméterek

Megnevezés	Mag cella méret	Mag cella falvastagság	Maghéj falvastagság	Kompozit héj falvastagság
Választott méret [mm]	10	0,5	1	1,5

Az optimalálás eredményként meghatároztuk a legmegfelelőbb topológiai paramétereket (2. táblázat), mellyel a kiindulási értékekhez képest 29%-os tömegcsökkenést értünk el a merevség megtartása mellett. A különböző paraméterekkel elvégzett szimulációk alapján egyértelmű volt, hogy a sejtmag cellaméret és a cella falvastagsága elenyésző mértékben visel hajlító terhelést. A kizárólag ragasztott mag- és kompozit héjakon elvégzett testek lehajlása a kicsivel több mint 1%-kal haladta meg a diszkrét pontos optimalálás alapján meghatározott cellákkal kitöltött próbatest lehajlását. Gyakorlati tapasztalatként fontos megjegyeznünk, hogy a belső kitöltés alsó határát a vákuuminfúzió során előálló külső nyomás képezi, amely megroppantja a burkolatot amennyiben a belső mátrix nem képes elviselni a hidrosztatikus feszültségállapotot.

3. táblázat. UD CF/EP kompozit anyag mért mechanikai tulajdonságai

Paraméter	Magasság	Szélesség	Keresztmetszet	Szakítószilárdság	Szakadási nyúlás	Húrmodulus
Átlag	2,80 mm	20,12 mm	56,30 mm ²	947 MPa	1,0 %	84,04 GPa

A szimulációk validálása és korrigálása érdekében a MS EN ISO 527/4² szerinti szakítóvizsgálatokat folytattunk 6 db próbatesten (3. táblázat). A 6 rétegű UD CF/EP³ próbatest 310 g/m²-es karbonszövet, ipox MR3010-es gyanta és MH3124-es térhálósító felhasználásával készült. A száltartalom körülbelül 40 V/V% volt. Az átlagolt anyagtulajdonságok és a valós gyártmány rétegirányai, kitöltési arányai alapján korrekciós tényezőket (4. táblázat) állapítottunk meg a szimulációs modell és a valós rugalmassági modulus között,

amelyek alkalmazásával megbecsültük a karok várható merevséget (5. táblázat). A legyártott karokon két pontos hajlítóvizsgálatokat végeztünk, melyek eredményét felhasználva analitikus szilárdságtani összefüggésekkel kiszámítottuk a valós merevségüket. A mért és számított értékeket összehasonlítva elmondható, hogy a numerikus modell használatával kellően pontosan közelítettük a valós viselkedést.

4. táblázat. Numerikus modellben használt anyagmodell korrekciója

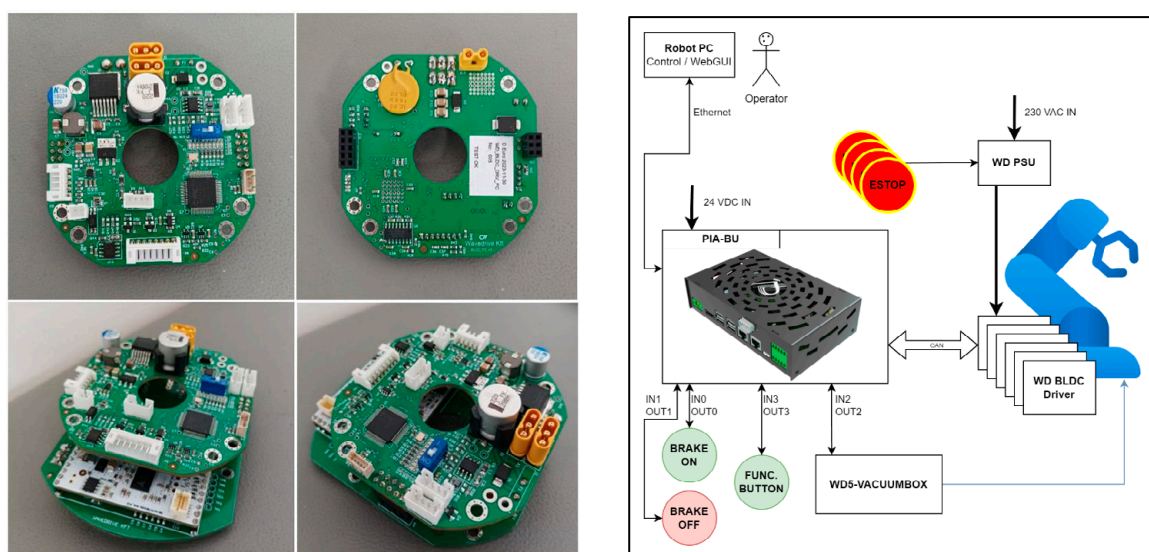
Szimulációk	Rugalmassági modulusok		Korrekciós tényezők	
	Mérés	Korrigált	Rétegrend	Szimulációs
60 GPa	84 GPa	42 GPa	0.5	0.7

5. táblázat. Korrigált számított merevség és hajlítóvizsgálatok eredményének összehasonlítása

Próbatest	Korrigált számított merevség	Mérések alapján számított merevség	Fajlagos eltérés
GR6 245	$8,57 \cdot 10^4 \text{ Nm}^2$	$7,54 \cdot 10^4 \text{ Nm}^2$	13,66%
GRS 220	$4,56 \cdot 10^4 \text{ Nm}^2$	$4,35 \cdot 10^4 \text{ Nm}^2$	4,83%

6. INTEGRÁLT CSUKLÓPONT ÉS ROBOT MOZGÁSVEZÉRLŐ

A ConfigPRO robotcsalád elosztott intelligenciájú vezérlőrendszerének hardveres alapját a csuklókba integrált PC (Program and Communication) és MD (Motor Driver) panelek képezik. A PC-panel dedikált feladata a mikrovezérlő-alapú firmware futtatása, az abszolút enkóderek jeleinek feldolgozása, valamint a CAN-busz protokoll szerinti hálózati kommunikáció menedzselése. Ezzel szoros egységben az MD-panel látja el a BLDC motorok háromfázisú teljesítménykiszolgálását, beleértve a túláramvédelmi, szenzorikai és fékvezérlési funkciókat. A teljes hálózat koordinációjáért a PIA-BU központi vezérlőegység felel, amely master egységként biztosítja a ROS-Industrial architektúra és a fizikai csuklók közötti átvételi-interfészt, lehetővé téve a valós idejű mozgástervezést és a grafikus betanító környezettel való adatkapcsolatot (2. ábra).



2. ábra. Integrált hajtásvezérlő és rendszerarchitektúra

7. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS FEJLESZTÉSI TAPASZTALATOK

A SCARA vizsgálata során a hullámhajtóműves robotcsuklók alkalmazásával a visszaállási pontosság maximális hibája 2,57'' volt 5 kg-os terhelés mellett. Az egyedi hajtással kialakított 3. és 4. csuklók szöghiba maximuma 1,22'', a függőleges mozgatás hibája pedig maximum 1 mm. A hattengelyes roboton elvégzett visszaállási pontosság hibájának maximuma 1,67'' volt szintén 5 kg-os terhelés mellett.

8. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS LÉTJOGOSULTSÁG A PIACON

A Wavedrive Kft. ConfigPRO projektje során sikeresen kifejlesztésre került egy moduláris robotcsalád, amely kompozit technológiával és integrált vezérlésű hajtásrendszerekkel rendelkezik. A hajlító- és

csavarómerevségi vizsgálatok, valamint a HDB egységeken végzett hatásfokmérések biztosítják a robotok ipari alkalmazhatóságát. A fejlesztett hibrid karstruktúra jelentős tömegcsökkentést tett lehetővé azonos merevség mellett, ami növeli a dinamikai pontosságot és a hasznos teherbírást.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt a GINOP_PLUSZ-2.1.1-21-2022-00015 azonosítószerű pályázat keretében, a Nemzetgazdasági Minisztérium és az Európai Unió támogatásával valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Krisc R., Killi G., Farkas Zs.: Strain wave differential planetary drive system development at Wavedrive Ltd.
- [2] MS EN ISO 527/4: Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites
- [3] UD CF/EP: unidirectional carbon fiber/epoxy
- [4] Wavedrive Kft.: *GINOP-2.1.2-8-1-4-16 Kutatási jelentés és dokumentáció, 2025.*