

## Rehabilitációs robotkéz-modul fejlesztése

### Rehabilitation robot hand modul development

BAUER Márk<sup>1</sup>, TÓTH András<sup>1</sup>, Szalay Tibor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány- és Technológia Tanszék

Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3., G épület, Tel: 06/20-621-28-75, Fax: 06/1-463-3176

E-mail: [bauer.mark@manuf.bme.hu](mailto:bauer.mark@manuf.bme.hu), Honlap: <http://www.manuf.bme.hu>

Szerző kutatási területei, témája: Szerszámgépek és gyártórendszerek tervezése, Irányítástechnika, folyamatszabályozás

#### Kivonat

*A stroke miatt bekövetkezett felső végtagi funkcióvesztés robotos gyógytornáztatással történő rehabilitációja során a kézfejet egy egyedi fejlesztésű és gyártású kézmodullal alkalmassá tesszük aktív vezetett mozgásterápia támogatására. A konferencián a kézmodul tervezésének főbb lépései kerülnek bemutatásra, a gépészetten át egészen a villamos tervekig. A rehabilitációs eszköz célja a féloldalt bénult spazmusban szenvedő betegek kézfejének gyógytornáztatása programozható módon. A spazmus lényegében egy izomgörcs, gyakorlatilag az izom vagy izomcsoport hirtelen beálló, önkéntelen, fájdalmas összehúzódása, melynek oka az agyvérzés következtében kialakult idegsérülés. Az eszköz két részegységből áll: egy három szabadságfokú és egy két szabadságfokú síkbeli, soros kinematikájú, tisztán rotációs csuklókból felépített modulból. A három szabadságfokú robotujj a mutató, középső és gyűrűs ujjat mozgatja egy, az ujjak felett elhelyezett teherelosztó segítségével. A teherelosztóhoz mágnesek segítségével csatlakoznak az ujj ortézisek. A két szabadságfokú robotujj a hüvelykujjat mozgatja, a zárásnak megfelelő (két szögben megdöntött) sík mentén. A rehabilitációs eszköz lehetővé teszi a bal-és jobb kéz cseréjét, így mindkét oldal rehabilitálására lehetőség van.*

#### Abstract

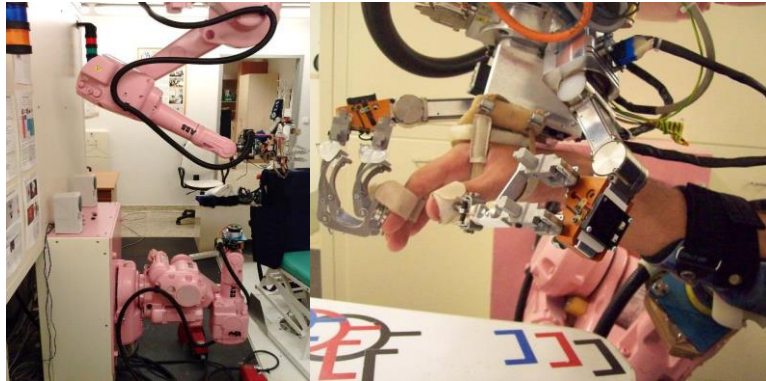
*During the rehabilitation of stroke upper limb function loss by robotic physiotherapy, the hand is adapted to support active guided motion therapy with a unique developed and manufactured hand module. This paper presents the major parts of the hand rehabilitation module design, from mechanical design to electrical planning. The main purpose of the rehabilitation hand module is do a programmable robotics physiotherapy of the hand of the spasm patients. Spasm is basically a sudden, involuntary, painful contraction of the muscle, virtually a muscle or group of muscles, due by nerve damage caused by a stroke. The device consists of two components, a three-degree module and a two-degree modul which is a serial kinematic, purely rotationally articulated module. The three-degree robot finger moves the index, middle and ring fingers through a load distributor, which is located above the fingers. The orthoses of the fingers are connected to the load distribution with magnets. The two degrees of freedom module moves the thumb along a plane (tilted at two angles) to close it. The rehabilitation device facilitate the side change on the left and the right hands, so it can rehabilitate both sides of the hand.*

**Keywords:** Hand exoskeleton, Wearable structure, Force control, Hand rehabilitation, Finger rehabilitation, Stroke rehabilitation, Rehabilitation robotics

## 1. BEVEZETÉS

A cikkben bemutatásra kerülő modul az Országos Orvosi Rehabilitációs Intézetben felépült Reharob robotos gyógytornáztató berendezés kiegészítése, továbbfejlesztése során kerül alkalmazásra. A továbbfejlesztés során a Reharob gyógytornáztató berendezést kiegészítjük egy kézmodullal és alkalmassá tesszük aktív vezetett mozgásterápia támogatására. Az alap rendszer a görcsös féloldali bénulásban, orvosi szakkifejezéssel élve spazmusban szenvedő betegek mozgásterápiájának a gyógytornászok számára megterhelő feladatait ipari robotok alkalmazásával segíti. Az 1. ábrán látható a

Reharob rendszer felépítése, valamint a „mennyezetén” elhelyezkedő IRB1600-as robot végén található a kézfej mozgását/rehabilitációját megvalósító régi kézmodul.



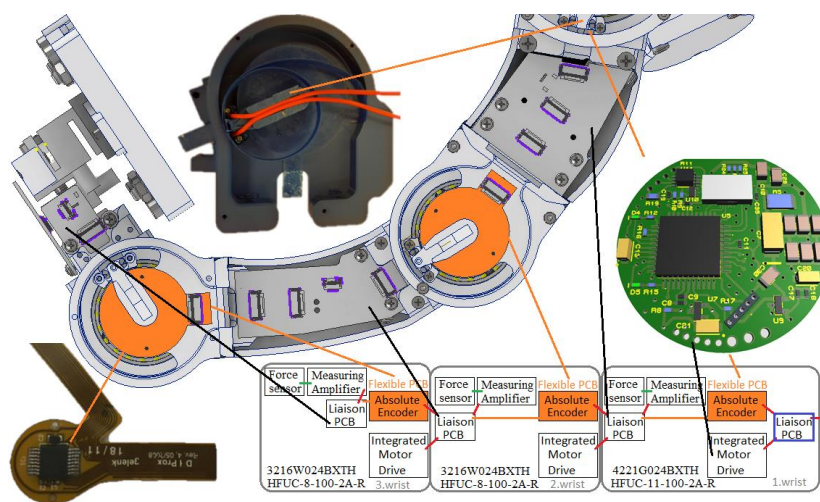
1.ábra Reharob rendszer felépítése (kézmodul, ABB robotkarok)

## 2. RENDSZER FELÉPÍTÉSE

Az újratervezett, javított soros kinematikájú, tisztán rotációs csuklókból álló modulok felépítése az alábbi: az egyes rotációs csuklókat hullámhajtóművek és a hajtóműveket direktben hajtó Faulhaber gyártmányú kefenélküli, elektronikus kommutációjú egyenáramú motorok (Brushless DC) mozgatják. A csuklókon ébredő nyomatékokat a csuklók közé elhelyezett Forsentek gyártmányú, FMZK-100 típusú 100[N] méréshatárú, nyúlásmérő alapú mérőcellák érzékelik. Az egyes erőmérőcellák radiális, azaz normál irányú erőt érzékelnek, a csuklók közötti fix geometriai távolságok ismeretében a radiális irányú erőkből a csuklón ébredő nyomaték számítható. Az erőmérőcellák esetleges túlterhelés védelme a burkolat mechanikai felfekvésével megoldott. A normál irányra merőleges erő komponens az ujj végén elhelyezett Forsentek gyártmányú, FSSM-100N típusú nyomó és húzó irány érzékelésére alkalmas mérőcella érzékeli. A csuklók szögpozícióját AS5047 típusú Hall elemes abszolút szögjeladók mérik. Az egyes csuklók integrált teljesítmény elektronikával vannak szerelve, melyek a BLDC motorok végén helyezkednek el, fogadják az abszolút jeladókat és az erőmérőcellák feldolgozását végző ADC SPI jeleit. Az AS5047-es abszolút jeladó és az ADC122S101 két független SPI vonalon kommunikál a hajtásra integrált dsPIC33EP512GM304 mikrokontrollerrel. A kefenélküli motorok vezérlését DRV8308 kontrollert végzi. Ez a célhardver számos vezérlési és védelmi funkciót valósít meg, a figyelembe vett jellemzők között szerepel a motor feszültsége, annak árama, a félhídakat alkotó FET-ek Gate feszültsége és árama, valamint az eszköz hőmérséklete is. Hiba esetén a hardver leállítja a hídvezérlést, a FET-ek károsodásának és a motor túlmelegedésének elkerülése érdekében, valamint hibajelét is generál. Az integrált teljesítmény elektronikai panelek full duplex RS-422 kommunikációs vonalon kommunikálnak a felsőbb szintű vezérlőhöz kötött kommunikációs elosztó egységgel. Az RS-422-es hardveres kialakítás a szimmetrikus, differenciális felépítés miatt kerül alkalmazásra a kommunikáció zavar érzékenységének csökkentése végett. A slave egységeket a mastertől jövő szinkronizáló jel ütemezi. Minden slave egység ezen külső interrupt jel hatására végzi el a mért adatok küldését, ezáltal az egymástól független egységek időben szinkronizálttá válnak, így a szabályozó ütemezése állandósítható. A slave egységek folyamatosan szinkronizálják magukat a külső ütemező jelre, így a rendszer kommunikációjából adódó Jitter (periódusidő átmeneti megváltozása, vagy ingadozása rövidtávon, mely jelenség kiküszöbölendő, hiszen hatására időzítésbeli bizonytalanságok léphetnek fel) mértéke minimalizálható. A csuklókba integrált teljesítmény elektronikai panelek 24[VDC] tápfeszültségről tápláltak, erről a feszültségről üzemel a kefenélküli motor meghajtását végző végfokozat és a működéshez szükséges belső tápfeszültséget előállító kapcsolóüzemű DC-DC (Step Down) konverter is. A teljesítmény elektronikai panel a motor végén helyezkedik el, FFC csatlakozón keresztül csatlakozik a robotujj csuklóiban elhelyezett belső kommunikációs PCB-re. Ez az elosztó panel köti össze a robotujj egyes csuklóit egymással, funkciója a bejövő RS-422-es kommunikációs vonalak továbbítása, valamint elosztása a csuklóban és a következő csuklóban található teljesítmény elektronika egység számára, valamint a teljesítmény elektronikai egység és a flexibilis áramköri lemez összekötése. A rotációs csuklók közötti jeleket -amely tartalmazza a rotációs csuklók RS422

szintillesztett szeparált RX,TX kommunikációs jeleit, a hajtáshoz tartozó abszolút szögjeladó, valamint a mérőcella feldolgozását végző ADC SPI kommunikációs vonalait- flexibilis áramköri lemez továbbítja, a szabad mozgás biztosítása érdekében a flexibilis PCB a csuklópont körül feltekert állapotban található, forgás közben annak hossza ezáltal változni képes. Ezen áramkörre kerül elhelyezésre az abszolút jeladó IC is, a HAL IC-hez tartozó alumínium konzol az IC felett van elhelyezve, a csukló mozgó feléhez két darab csavarral rögzül, így a csuklóval együtt fordul el a konzolban elhelyezett kétpólusú mágnes.

A teljesítményelektronikai modulok tápellátása (jelentős áramfelvétel) hajlékony, szilikon kábelek felhasználásával (Stäubli FlexiVolt-E) megoldott a csuklón belül. Mivel a villamos motorok összárám terheléséből adódó szükséges vezetősáv keresztmetszet, valamint a csuklón belül rendelkezésre álló hely nem teszi lehetővé az igényelt teljesítmény flexibilis áramköri lemezen történő továbbítását. A hajlékony szilikon kábelek a flexibilis áramköri lemez felett helyezkednek el, pozíciójukat, megvezetésüket a HAL IC-hez tartozó alumínium konzolok biztosítják, kábelek a csuklóokban található elosztó panelekhez csatlakoznak. A robotujj mozgatását megvalósító inverz kinematikai (matematikai) modul, valamint a pálya felvételét és az erőszabályozást megvalósító admitancia szabályozó a felsőbb szintű vezérlőben kerül implementálásra. A valós idejű számítási kapacitás könnyebben biztosítható PC alapú architektúrával és realtime operációs rendszerrel, mint beágyazott eszközzel, továbbá az algoritmus implementációja (esetleges módosítása) is gyorsabb. Az admitancia szabályozó paraméterei (előírt merevség, csillapítás) a gyógytorna során állíthatók, ezáltal a robotujj a kívánt hatást éri el. A csuklóokban kaszkád szabályozás került implementálásra, az egyes motorokon sebesség szabályozás valósul meg, alárendelt áramszabályozás és felérendelt pozíció szabályozás mellett. Az admitancia szabályozó pozíció alapjelet szolgáltat a robotujj egyes csuklóinak számára, a pozíció időbeli változásának mértéke (a pozíció trajektóriája) meghatározza a modulon ébredő reakció erőt. Az előírt nyomaték tehát a szabályozási láncban belül pozíció alapjelként értelmezhető. Az előírt pozíció a hullámhajtómű gyűrűkerekének elmozdulása révén jön létre, így a pozíció szabályozás visszacsatolása az áttétel kihajtó felén valósul meg, így a szabályozási láncba egy holtidős tag jön létre, ami relatíve nagy időállandóval rendelkezik. A rendszerben tehát ekkora időnek kell eltelnie, hogy a bemenet hatása a kimeneten megjelenjen. A 2.ábrán a hajlékony kábelek, a flexibilis nyák (a képen látható kék színű elem a flexibilis PCB 3D nyomtatott ABS anyagú teszt példánya), valamint a modulon belül megvalósított kábelezés struktúrája és az integrált teljesítményelektronika 3D-s modellje látható.

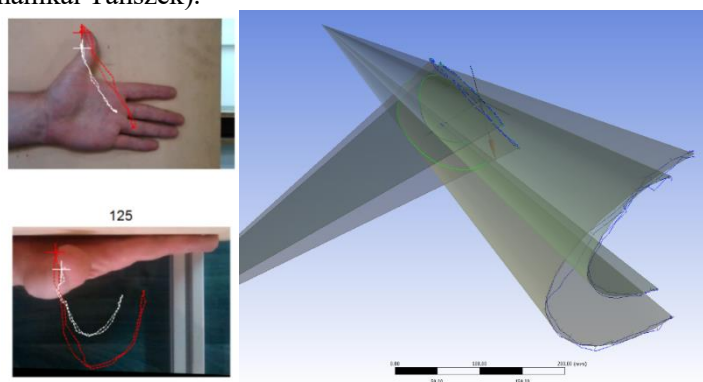


2.ábra Rehabilitációs robotujj rendszertechnikai felépítése

A teljesítményelektronikán elhelyezett dsPIC33EP512GM304 típusú mikrokontroller analóg és digitális csatornáit külön tápfeszültség referenciáról táplálták, ennek oka, az ADC referencia feszültségének stabilizálása. A mérőerősítő és az abszolút jeladó 5V tápfeszültségről táplált és közvetlen LDO-val rendelkezik. A mérőerősítő külön áramköri lapon, a mérőcellához közel helyezkedik el és a flexibilis áramköri lemezen keresztül SPI vonalon kommunikál az integrált teljesítményelektronikával. A mikroprocesszor szintillesztést követően, beépített ADC csatornán méri a bejövő buszfeszültséget, valamint a hídáramot, ezáltal a motor túlterhelés védelme és a buszfeszültség változásának kompenzálása (PWM) kontroll cikluson belül megoldott.

### 3. MECHANIKAI TERVEZÉS

A bevezetőben ismertetett tervezési kritériumok alapján a terápiás célokat szolgáló rehabilitációs eszköz két részegységből áll: egy három szabadságfokú (3DOF) és egy két szabadságfokú (2DOF) síkbeli, soros kinematikájú, tisztán rotációs csuklókból felépített modulból. A három szabadságfokú robotujj a mutató, középső és gyűrűs ujjat mozgatja egy az ujjak felett elhelyezett teherelosztó segítségével. A teherelosztóhoz mágnesek segítségével csatlakoznak az ujj ortézisek. A két szabadságfokú robotujj a hüvelykujjat mozgatja, a zárásnak megfelelő (két szögben megdöntött) sík mentén. A szükséges sík meghatározásához mérőrendszert építettünk fel, amely két egymásra merőlegesen elhelyezett kamerát tartalmazott. A hüvelykujjra rögzített markerek alkalmazásával a mozgás során képkockánként rögzített felvételtől, valamint a két kamera látószögének metszéséből megkaptuk a mozgáspálya térbeli elhelyezkedését. A kamerák által felvett pontok koordináta értékeit CAD rendszerbe lehetett importálni. A mozgáspálya egy kúpfelületet eredményez, amely felület jól közelíthető egy megfelelő mértékben döntött sík mentén megvalósuló két szabadságfokú mozgatással (lásd: 3.ábra). A hüvelykujj megfogását az utolsó ujjpercen elhelyezett ortézis biztosítja. Az ujj zárásakor létrejövő elmozdulást a csapágyazott csukló teszi lehetővé. A mérések megvalósításáért köszönettel tartozom Dr. Magyar Bálint adjunktusnak (BME, Műszaki Mechanikai Tanszék).

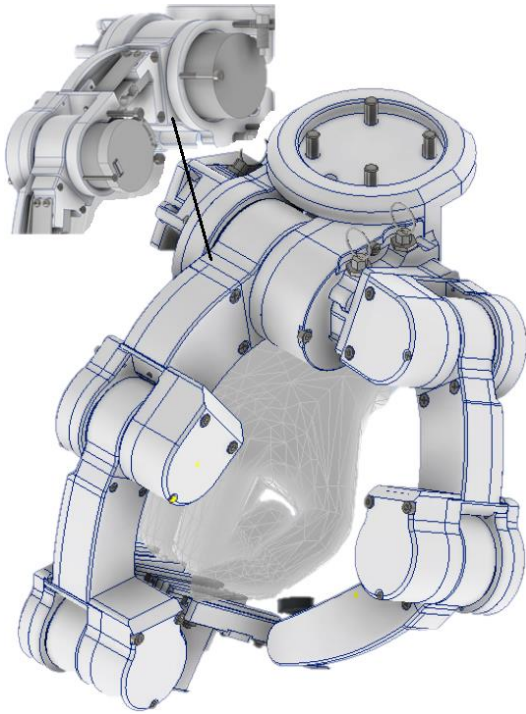


3.ábra Hüvelykujj mozgáspályájának mérése, a mozgáspálya CAD modellje

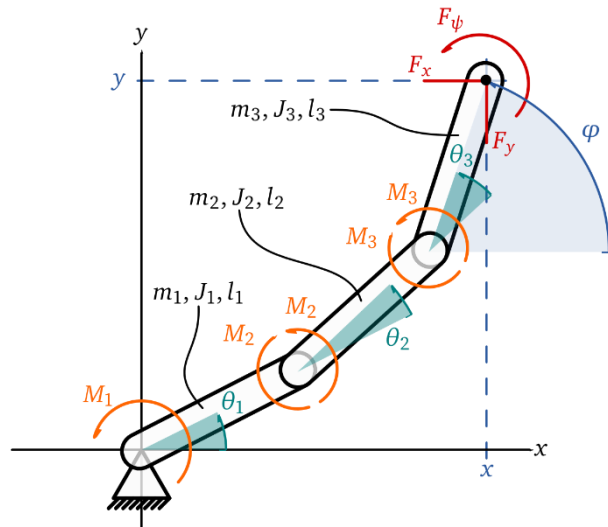
A három szabadságfokú robotujj lehetővé teszi a kéz teljes zárását és nyitását, valamint a modul átfogja a kéz antropometriai mérettartományát 60 és 95 percentilis méret között. Ezáltal az eszköz alkalmas női és férfi páciensek rehabilitálására is. A kézfejet a rehabilitációs eszközhöz egy egyedi tervezésű kézfej ortézis rögzíti, amely a páciens méreteinek megfelelően méretsorozat szerint (Small, Medium, Large) cserélhető, az ortézis rugós előfeszítés alkalmazásával biztosítja a kézfej stabil megfogását. A belső felület ívének kialakítása a kézfej felső ívét követi. A rehabilitációs eszköz lehetővé teszi a bal- és jobb kéz cseréjét, így mindkét oldal rehabilitálására lehetőség van. A robotujjban két méretű hajtómű és két féle motor került alkalmazásra. A kisebb méretű csuklóban 3216W024BXTH, HFUC-8-100-2A-R 4.8[Nm], a nagyobb méretű csuklóban 4221G024BXTH, HFUC-11-100-2A-R, amely 11[Nm] nyomaték leadására képes. A BLDC motor a hajtómű hullámgenerátorra hajt be, a hullámkerék az álló csapágyházhoz fixen rögzített, a gyűrűkerék (merev kerék) a csuklókat mozgatja, azaz a kihajtás a gyűrűkerék elmozdulásával megvalósított. A pozíciót a kihajtó oldalon, a rögzített csapágyházhoz képest direktnen mérjük (lásd: 2.ábra), ez szolgáltatja a pozíciószabályozás visszacsatoló jelét. Az egyes csuklók között integrált erőmérőcellák mérik a reakcióerőket, a geometria ismeretében a csuklónyomatékok számolhatóak. A megvalósított mechanikai konstrukció merev és jól szabályozható felépítést tesz lehetővé, az indirekt (bovdenes) mozgatással szemben jóval pontosabban, kisebb veszteséggel. Az ujjak végén, az ortézisek rögzítésénél két komponensű (X,Y síkú) erőmérés került beépítésre, így a csuklónyomatékon túl a nyomatéokra merőleges erőkomponens is mérhető.

A 4.ábrán a terápiás célokat szolgáló rehabilitációs eszköz 3D-s terve látható. A képen látható a 2DOF hüvelykujj modul döntési szögeit megvalósító, illetve a felcserélhetőséget lehetővé tevő T-nút kialakítású rögzítő betét is. A képen észrevehető, hogy az oldalcseré miatt a hüvelykujjas modul az eszköz bal oldalán a jobb oldalon látható vízszintes elhelyezéshez képest eltérő szögben rögzül. Ennek oka, hogy a modul felcserélhetőségét megvalósító T-nútos betét az oldalváltás során a helyén marad, ezért a jobb oldali kézpozíció miatt megvalósításra került –a jobb kéznek megfelelő- elforgatást

kompenzálni kell. A modult rögzítő T-nútos betét beépített villamos csatlakozóval van ellátva, így az oldalsó váltás során a modul villamos csatlakozása a mechanikai rögzítés után megoldott (oldalsó váltáskor nincs szükség kábelezésre). Az oldalsó váltást kihúzható tájolócsapok teszik könnyen megvalósíthatóvá. A páciens ujjain lévő ujjortézisek a rehabilitációs eszközhöz mágnesek felhasználásával rögzülnek.



4. ábra DMRF robot ujj



5. ábra DMRF robot ujj mechanikai modellje

A munka a GINOP-2.3.3-15-2016-00032 pályázat keretein belül valósul meg.

## 4. KONKLÚZIÓ

Kidolgoztunk és kifejlesztettünk egy kézfej és ujjak rehabilitálására alkalmas robotrendszert. A létrehozott rendszer moduláris felépítése, könnyű tömege, kis térfogata és jól szabályozható mechanizmusa lényegesen javítja a kézügyességet, elősegíti a motoros működés javulását. A gyártást és összeszerelést követően megkezdődhet a rendszer értékelése. Az eszköz megkülönböztető tulajdonságai alapján várhatóan kiemelkedő teljesítményt nyújt a jelenleg meglévő rendszerekhez képest.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Agarwal, Priyanshu, Jonas Fox, Youngmok Yun, Marcia O'Malley, és Ashish Deshpande. „An index finger exoskeleton with series elastic actuation for rehabilitation: Design, control and performance characterization”. *The International Journal of Robotics Research* 34 (2015. október 27.). <https://doi.org/10.1177/0278364915598388>.
- [2] Aicardi, M., G. Cannata, és G. Casalino. „Task space robot control: convergence analysis and gravity compensation via integral feedback”. In *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*, 3:3032–37 köt.3, 1996. <https://doi.org/10.1109/CDC.1996.573585>.
- [3] Do, Thanh Nho, Tegoeh Tjahjowidodo, Michael Wai Shing Lau, és Soo Jay Phee. „Position Control of Asymmetric Nonlinearities for a Cable-Conduit Mechanism”. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 14, sz. 3 (2017. július): 1515–23. <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2438319>.
- [4] Iqbal, Jamshed, Omar Ahmad, és Ahsan Malik. „HEXOSYS II - towards realization of light mass robotics for the hand”. In *2011 IEEE 14th International Multitopic Conference*, 115–19, 2011. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2011.6151454>.
- [5] Jo, Inseong, és Joonbum Bae. „Design and Control of a Wearable and Force-Controllable Hand Exoskeleton System”. *Mechatronics* 41 (2017. 0 1.): 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.12.001>.
- [6] <https://www.ogvej.gov.hu/orvostechnikai-eszkozok-megfeleloseg-ertekelese/>
- [7] <http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/mikromechanika/ch03.html>