

Horváth Péter¹, Ballagi Áron², Nagy Attila³, Kuti Rajmund⁴

AZ EXOSKELETON KATONAI ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI (MILITARY APPLICATIONS OF EXOSKELETON)

Az ember fizikai teljesítőképességének növelése érdekében alkalmazható műszaki megoldások kutatása nem új keletű. Különösen a katonai fejlesztések kaptak prioritást, amelyek az emberi test teherbíróképességének, hordképességének növelése irányába valósultak meg. Az exoskeleton, vagy mesterséges külső váz alkalmazásának kutatás-fejlesztése is első sorban a katonai felhasználási lehetőségek bővítésének irányába folyik napjainkban is. Írásunkban az exoskeleton aktuális hazai és nemzetközi fejlesztési irányait tekintjük át. Vizsgáljuk a gyakorlati alkalmazások műszaki hátterét, továbbá elemezzük a készülékek katonai alkalmazási lehetőségeit. Kutatási eredményeink bemutatásával elő kívánjuk segíteni az eszközök elterjedését, valamint az egyes fejlesztések adaptációját más felhasználási területeken is.

Kulcsszavak: fizikai teljesítmény növelése, exoskeleton, katonai alkalmazások

The research of technical solutions that can be used to increase man's physical performance is not a new achievement. In particular, military developments have been given priority, which have been directed towards increasing the bearing capacity of the human body. The research and development of the use of exoskeleton or artificial outer frame also extends in the first place to the expansion of military use nowadays. In our paper, we review the current national and international development directions of Exoskeleton. We examine the technical background of practical applications and analyze the military applications of devices. By presenting our research results, we want to promote the spread of the devices as well as their adaptation other applications.

Key words: increase physical performance, exoskeleton, military applications

BEVEZETÉS

Az élőrő megóvása, fizikai teljesítményének megőrzése, teherhordó képességének növelése különösen fontos a hadseregek számára. Az exoskeleton, vagy mesterséges külső váz az emberi testre felszerelhető, oldható kötésekkel rögzíthető szerkezet, amely külső csontvázként funkcionálva segíti használóját a munkavégzésben. Az eszközök speciális alkalmazását katonai területre fejlesztették ki, a katonai kutatások elsősorban a katonák teherbírásának – a rendszeresített felszerelések hordozását segítő képességek – növelése irányába folynak

¹ Gépészeti Tudományok PhD, egyetemi docens, tanszékvezető, Széchenyi István Egyetem, GIVK Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék, e-mail: horvathp@sze.hu, ORCID: 0000-0001-6872-3414

² Műszaki Tudományok PhD, egyetemi docens, tanszékvezető, Széchenyi István Egyetem, GIVK Automatizálási Tanszék, e-mail: ballagi@sze.hu; ORCID: 0000-0002-5458-5249

³ PhD hallgató, egyetemi tanársegéd, Széchenyi István Egyetem, GIVK Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék, e-mail: anagy@sze.hu, ORCID: 0000-0002-4115-0625

⁴ Katonai Műszaki Tudományok PhD, egyetemi docens, Széchenyi István Egyetem, GIVK Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék, e-mail: kuti.rajmund@sze.hu, ORCID: 0000-0001-7715-0814

napjainkban is. Az exoskeleton felvételével a teherhordó, vagy nehéz fizikai munkát végző katona lábainak és ízületeinek megtámasztásával, megerősítésével mintegy tízszer akkora teher elviselésére lesz képes, mivel a terhelést a külső váz veszi át az emberi testtől (1. sz. kép).



1. sz. kép: Exoskeleton használat közben, (Forrás: [1])

A képen is jól látható, hogy az exoskeletont a nehéz terepen történő közlekedés, a rendszeresített felszerelések hordozásának megkönnyítése érdekében használják. A technika robbanásszerű fejlődése teszi lehetővé az eszközök folyamatos fejlesztését, a felhasználási lehetőségek szélesítését, melyet folyamatosan kutatni kell. Fontosnak tartjuk írásunkban bemutatni az exoskeleton eddigi katonai alkalmazási területeit, áttekinteni a jelenlegi kutatásokat, továbbá rávilágítani a jövőbeli adaptációs lehetőségekre, más területeken történő felhasználásra.

AZ EXOSKELETON FEJLŐDÉSE

A katonai eszközök alkalmazását, a fejlesztési nehézségek leküzdését mindig a háborúk segítették elő. A katonai exoskeletonok története is tele van nehézségekkel. A katonai páncélzat fejlesztése, a terepen történő mozgás könnyítése régóta foglalkoztatta a kutatókat. Több eljárást szabadalmaztattak, amelyek körvonalazzák, hogy egy katonai exoskeletonnak hogyan kell kinéznie, a kutatók a területen megállapították, hogy a technológia messze van attól, hogy aktív harci zónába kerüljön. A kórházak, a rehabilitációs központok és a gyárak viszonylag szabályozott és strukturált környezete sokkal termékenyebb alapot biztosított a hordható robotok megvalósításához. 2010-ben az amerikai hadsereg két nagy exoskeleton projektjét hozták nyilvánosságra, az Exo Bionics és a Lockheed Martin HULC⁵, valamint a Sarcos / Raytheon XOS és XOS2 típusú eszközöket. Mindkettő teljes testalkatú volt, a használó katona mobilitás növeléséhez járultak hozzá. Mindkét projekt ígéretesnek tűnt, de a hadsereg által lefolytatott tesztek eredményei alul múlták az elvárásokat.

⁵ HULC – Human Universal Load Carrier (emberi univerzális teherhordó)

Az első katonai exoskeletonok elsődleges problémája a méretük és az energiafogyasztásuk volt. Mivel mind a HULC, mind az XOS teljes testalkatú volt, nagy fémkerettel és több működtetővel rendelkeztek, ezért energiafogyasztásuk is nagy volt. Az XOS projekt elsősorban a motorok és a vezérlőrendszer fejlesztésére helyezte a hangsúlyt, azzal az elgondolással, hogy az akkumulátor technológia is olyan ütemben fejlődik majd, ami lehetővé teszi a motorok energia ellátását. Amikor világossá vált, hogy egyetlen akkumulátort sem képes hosszú időre működtetni az öltözéket, a fejlesztést törölték. A HULC projekt hasonló energiaellátási problémákat vetett fel, mint az XOS, de az Exo Bionics és a Lockheed Martin konszernnek nagyon keményen küzdöttek azért, hogy megfelelően működjenek. A HULC-t ismételten újra tervezték, hogy energiafogyasztását csökkentsék. Gázmotorok beépítésével is próbálkoztak, de annak üzemelése zajt keltett, ami a katonai alkalmazás körét beszűkítette. A következő képen a HULC exoskeleton látható.[2]

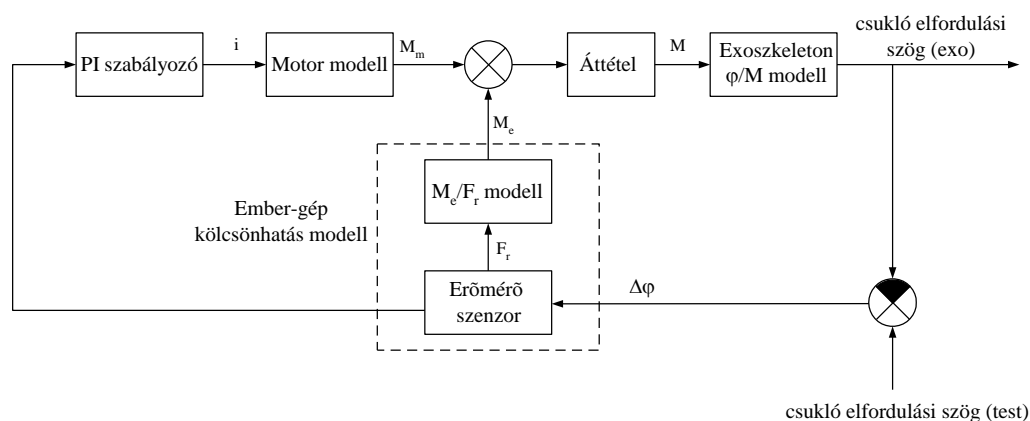


2. sz. kép: HULC exoskeleton, (forrás: [2])

Végül a HULC több órán keresztül saját erővel tudott mozogni, de a hadsereg további fejlesztéseket igényelt, ami a költségeket növelte, így az eszköz nem terjedt el igazán. A katonai exoskeletonokat alapul véve megindultak a kutatások az ipari felhasználás irányába, ahol az elvárások mások voltak. A katonai exoskeletonok ugyanolyan kihívásokkal szembesülnek, mint azok ipari változatai, kényelmes viselet, lehető leghosszabb üzemelési idő, integráció a már meglévő berendezésekkel és szabványokkal. A katonai exoskeletonoknak ugyanakkor együtt kell működniük a rendszeresített katonai felszerelésekkel is. Ez az oka annak, hogy a legújabb katonai exoskeletonok közül több változatnak a motorjai és működtető egységei vannak a felhasználó elülső vagy hátsó részén. Ez éles ellentétben áll a hagyományos exoskeletonok túlnyomó többségével, amelyek a készülék nagy részét a csípőnél vagy a lábak oldalán helyezik el. Továbbra is fontos elvárás a hosszú üzemelési idő mellett a tartósság, valamint a megbízhatóság is.[2]

AZ EXOSKELETON MECHATRONIKAI JELLEMZŐI

Egy exoskeleton szabályozásának célja, hogy az használója szándéka szerint mozogva jelentős terhet viseljen, miközben csupán csekély erőhatások ébredjenek közte és a felhasználó között. A hagyományos szabályozási eljárásokkal végzett fejlesztések eredményeként ugyan sikerült szinkronmozgást elérni az exoskeleton és az ember között, ám a járás folyamata még nem mondható természetesnek. Az egyik kézenfekvő szabályozási stratégia az erő-szabályozás, amely a felhasználó szándékának megfelelő valamilyen alapjellel arányos erőt, nyomatékot fejt ki az exoskeleton megfelelő részére. A probléma abban áll, hogy meglehetősen nehéz a felhasználó szándékát jól értelmezhető jellé alakítani. Ilyen tekintetben különböző lehetőségek vannak az exoskeleton felső és alsó végtagjainak szabályozásában. A kézzel olyan szándékos mozgást végzünk, melyet nem befolyásolnak jelentős külső hatások. Ilyen esetben a felhasználó szándékát jól tükrözik az izomműködés során mérhető elektromiográfiás (EMG) jelek. A millivolt töredékének nagyságrendjébe eső EMG jeleket elektródákkal el lehet vezetni a bőr felszínéről, majd erősítést és jelfeldolgozást követően alapjelként szolgálhatnak egy szervo szabályozásnak. Nehezíti a kérdést, hogy a jelek tartománya személyenként és a bőr nedvességétől függően változik, állandó terhelés esetén pedig a jel értéke időben csökken. Amennyiben az erőhatás helye a felhasználó és az exoskeleton között jól definiált, úgy erőmérő szenzorral a kölcsönhatás mérhető. Ha alapjelként mérsékelt kölcsönhatási erőt írunk elő, akkor egyszerű szabályozással elérhető, hogy az exoskeleton megfelelő tagja addig mozogjon, míg a kölcsönhatási erő az előírt értéket eléri, miközben az exoskeleton az ember által kifejtett erő, vagy nyomaték sokszorosát fejt ki. Erre a szabályozási elvre példaként szolgál Li és társai munkája [4], akik által az alsó végtagokra is alkalmazott szabályozási rendszer vázlata az 1. ábrán látható.

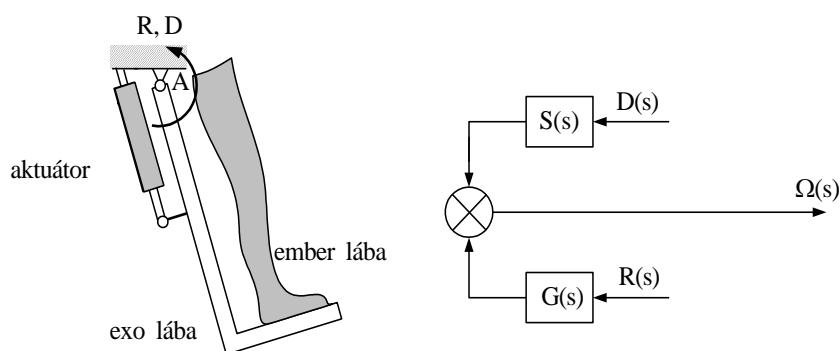


1. ábra. Erő szabályozás blokkdiagramja (Forrás: [4] alapján a szerzők kiegészítésével)

Ez a fajta exoskeleton csak ráségít a terhelésére, használójának kell a terhelés kisebb részét viselnie. Miután az erőmérő szenzor megmérte a kölcsönhatási erőt, jele feldolgozás és erősítés után közvetlenül szabályozza a motor áramát, ami a kifejtett nyomatékkal arányos. Ehhez a nyomatékhoz adódik hozzá az ember által kifejtett nyomaték, mely az exoskeleton tagot a forgáspont körül elfordítja. Amennyiben az elmozdulás nem tökéletesen egyezik meg a felhasználó elmozdulásával, a szabályozó tovább változtatja a motor áramát, mígnem az exoskeleton és a felhasználó mozgása közelítőleg azonos lesz. Kísérletek szerint a PI szabályozó nem képes minden sebességtartományban kielégítő eredményt szolgáltatni, ezért a

szerzők a szabályozó P és I tagjainak együttműködését adaptív fuzzy szabályozóval változtatták, miáltal sokkal jobb ember-gép kölcsönhatást, azaz természetesebb járást értek el jelentős terhek viselése mellett is.

Az alsó végtagokhoz rögzített exoskeleton részek szabályozásakor a felhasználó szándékának érzékelése számos nehézséggel jár. A kölcsönhatások meghatározásához sok szenzorra lenne szükség, mivel sem az érintkezési pontok helye, sem a kontakt erők iránya nem jól definiált, különösen terepi körülmények között. Még ha rendelkezésre is állna elegendő szenzor, akkor azok olyan erőket is mérnének, melyek nem a szándékolt mozgást szolgálják, hanem például a teherviseléssel arányosak. A talpra ható erők méréséhez különösen sok szenzorra lenne szükség, mivel a lépés során az erő támadáspontja a saroktól a lábujjig halad, ezért a cipő bonyolult és súlyos lenne. Arról nem is beszélve, hogy a nagy igénybevétel következtében ezek a szenzorok rövid időn belül tönkremennének. Nagyon érdekes, „érzékenység erősítésen” alapuló szabályozási módszert alkalmaztak a BLEEX (Berkeley Lower Extremity Exoskeleton) fejlesztői arra a célra, hogy ne kelljen mérni a kölcsönhatásokat az exoskeleton és viselője között [5]. A megoldás elvét egy egyszerű, egy szabadságfokú, lengő fázisban lévő „mesterséges láb” modellen mutatjuk be (2. ábra). A láb szabályozási rendszere hibrid, a talajon támaszkodáskor pozíciószabályozást, a lengő fázisban érzékenység erősítésen alapuló szabályozást alkalmaznak [6]. Az egyszerűség kedvéért az A pont körül elfordulni képes merev exoskeleton láb egy aktuátorral mozgatható, mely R nyomatékot fejt ki. A felhasználó által kifejtett erők támadáspontjait nem ismerjük, a kifejtett erőket sem mérjük. Az ember által az A pontra kifejtett nyomatékot jelölje D.

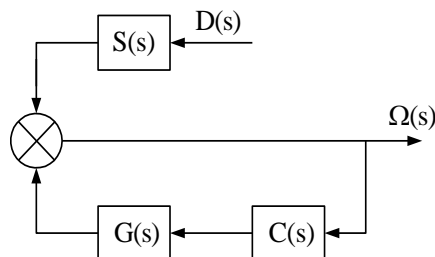


2. ábra. Egy szabadságfokú exoskeleton és blokkdiagramja (Forrás: [6] alapján a szerzők kiegészítésével)

Az exoskeleton szögsebessége operátor tartományban

$$\Omega(s) = G(s)R(s) + S(s)D(s) \quad (1)$$

ahol a $G(s)$ átviteli függvény az $R(s)$ aktuátor bemenetre vonatkozik, míg az $S(s)$ érzékenységi átviteli függvény az ember által generált $D(s)$ bemenetre vonatkozik. Általában erős és visszahatásmentes aktuátor esetében az aktuátor befolyása sokkal nagyobb a láb mozgására, mint az ember által gyakorolt hatás. Az új szabályozási stratégia célja az emberi hatásokra való S érzékenység növelése, vagyis hogy az ember minimális erőfeszítéssel tudja mozgatni a mülábat. Ez a cél szöges ellentétben áll a hagyományos negatív visszacsatolással, ahol éppen a külső hatásokra való érzékenység csökkentése a cél.



3. ábra. Az érzékenység növelése pozitív visszacsatolással (Forrás: [6])

Az érzékenység növelésére pozitív visszacsatolást alkalmaznak a 3. ábra szerint, melynek eredményeként az új érzékenység

$$S_{\text{új}}(s) = \frac{\Omega(s)}{D(s)} = \frac{S(s)}{1 - G(s)C(s)} \quad (2)$$

lesz. Ha úgy választjuk meg a $C(s)$ szabályozót, hogy az az exoskeleton dinamikájának inverzével arányos legyen, például $C(s) = 0,9G^{-1}(s)$, akkor az új érzékenység tízszerese lesz a réginek. A nem modellezett nagyfrekvenciás dinamika csökkentése érdekében $C(s)$ még tartalmazhat egységnyi erősítésű alul átteresztő szűrőt is. Mint látható, a szabályozó erősen modell-alapú, a szabályozás csak akkor működik helyesen, ha a rendszer modellje jól ismert. Bármely kis hatás, származzon az akár a felhasználótól, akár külső hatásból, az exoskeleton mozgását befolyásolja. A modell bármely paraméterének megváltozása csökkenti a szabályozás robusztusságát, sőt akár instabilitáshoz is vezethet. Az érzékenységi átviteli függvény változása

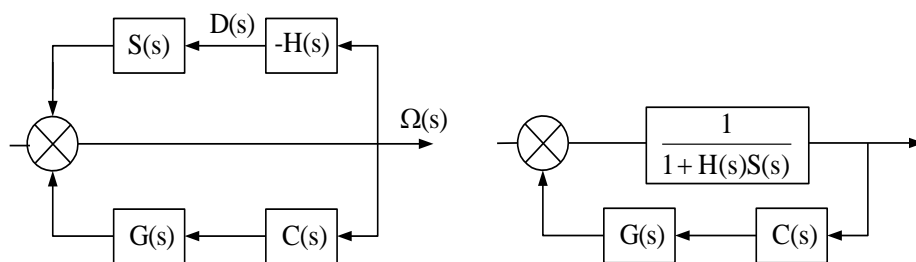
$$\Delta S_{\text{új}} = \frac{\partial S_{\text{új}}}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial S_{\text{új}}}{\partial G} \Delta G \quad (3)$$

ahonnan

$$\frac{\Delta S_{\text{új}}}{S_{\text{új}}} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{GC}{1 - GC} \cdot \frac{\Delta G}{G} \quad (4)$$

Minél közelebb van $G(s)C(s)$ az egységhez, a paraméterek változására való érzékenység is egyre nagyobb lesz. Az előbbi példa adataival $G(s)$ 10%-os hibája $S_{\text{új}}$ 90 %-os hibáját okozza!

Fontos kérdés, hogy az ember dinamikája hogyan befolyásolja az exoskeleton viselkedését? Ha megmozdítjuk az exoskeleton lábát $\Omega(s)$ -sel, akkor a rajta nyugvó láb $D(s) = -H(s)\Omega(s)$ nyomatékokot fejt ki az A pontra. Itt $H(s)$ az ember dinamikáját, más szóval impedanciáját kifejező átviteli függvény. A szabályozás ember dinamikájával kiegészített blokkdiagramja a 4. ábrán látható. A felső, tulajdonképpen negatív visszacsatolású hurok jellemzi az ember által kifejtett erők és nyomatékok hatását az exoskeleton mozgására, míg az alsó a szabályozott pozitív visszacsatolású hurok. A felső hurok stabilizálja a teljes, emberből és exoskeletonból álló rendszert.



4. ábra. A szabályozás ember dinamikáját is figyelembe vevő blokkdiagramja (Forrás: [6])

A szabályozás blokkdiagramjának egyszerűsítése után a rendszer stabilitását jellemző karakterisztikus egyenlet a következő lesz:

$$1 + S(s)H(s) - G(s)C(s) = 0 \quad (5)$$

Mivel a nagy érzékenység elérése érdekében $C(s)$ úgy kerül megválasztásra, hogy $|C(s)G(s)| < 1$ legyen, ezért a $|C(s)G(s)| < |1 + S(s)H(s)|$ reláció teljesül, a rendszer stabil. Ha azonban paramétermegváltozások következnek be, azokra igen érzékeny a rendszer. Ennek bemutatására tételezzük fel, hogy $S(s)=G(s)=1/Js$, ahol J az exoskeleton A pontra számított tehetetlenségi nyomatéka, s a Laplace-transzformáció operátora, a szabályozó pedig $C(s)=0,9G^{-1}(s)$. Vizsgáljuk meg azt az esetet, mikor a modell pontatlan, például egyetlen paramétere, a tehetetlenségi nyomaték 20 százalékkal kisebb a modellben számításba vett értékénél: $J^*=0,8J$. Az ember dinamikáját vegyük figyelembe $H(s)=as+b$ lineáris átviteli függvényvel. Ekkor $S^*(s)=G^*(s)=1/0,8Js$, a szabályozó viszont az eredeti tehetetlenségi nyomatékú rendszerre lett meghatározva, vagyis $C(s)=0,9Js$. A karakterisztikus egyenlet ekkor

$$1 + S^*H - G^*C = \frac{(10a - J)s + 10b}{8Js} = 0 \quad (6)$$

alakú lesz. Az egyenlet szerint a rendszer instabillá válhat, ha $J > 10a$. Összegezve az elmondottakat, a bemutatott szabályozás mindaddig stabil, amíg a modell paramétereinek eltéréseit sikerül kis értéken tartani.

ÚJ FEJLESZTÉSI IRÁNYOK

Az előzőekben bemutatott teljes testfelületen működő exoskeletonok fejlesztése továbbra is folyamatos, törekedve elsősorban a könnyebb szabályozásra, a kevesebb energiafogyasztásra, valamint a hosszabb üzemeltetésre. Ezeknek a szempontoknak figyelembe vételével a teljes testű exoskeletonokat különálló, vagy moduláris alsó és felső testtartású robotokká osztva külön irányba folytak a kutatások. Az alsó testtartású robotok a lábakat segítik, azok terhelését csökkentve. Ha a robot a teljes végtag mellett a talajig fut, akkor a viselő ember terhelésének továbbítására is használható. Ezek az eszközök kialakításukat tekintve készülhetnek keményfém vázzal, vagy részleges vázzal, bowdenes működtetéssel is. Alkalmazásukkal a katona mobilitását segítik, ugyanakkor terhelését csökkentik. A felső testtartású robotok általában a kezek funkcióit támogatják, vagy a kézi erőt növelik, például fegyver tartását, vagy célzást segíthetik. Kialakításuk hasonló az előzőekben ismertetett eszközökhöz.

A passzív exoskeletonok nem rendelkeznek semmilyen hajtóművel, akkumulátorral, valamint vezérlő elektronikával. Alkalmazásuk célja az emberi testet érő hatások egy részének csökkentése. Ilyen a mozgó kar Exoskeleton, melynek a lőfegyver stabilizálás a fő célja. A rázkódás-gátló exoskeletonok kutatásai eredményei alapján, a természetes kézmozdulatok további szuppresszálhatósága a cél a technológia megtartásával. Az eddigi fejlesztések rendkívül ígéretesek, és a vizsgázók képesek voltak arra, hogy pisztollyal javítsák célzásukat a tesztek során. [3]

ÖSSZEFOGLALÁS

Írásunkban az exoskeleton aktuális hazai és nemzetközi fejlesztési irányait tekintettük át. Elsődlegesen az eszközök katonai felhasználási lehetőségeit vizsgáltuk, ugyanis az élőerő fizikai paramétereinek fenntartása terepi körülmények között kiemelkedő jelentőségű tényező. Áttekintettük továbbá a készülékek gyakorlati alkalmazásának műszaki hátterét, vizsgáltuk a mechatronikai jellemzőiket, felhívtuk a figyelmet használatuk előnyeire, hátrányaira. Rávilágítottunk, hogy ezek a szerkezetek a használó saját fizikai erejének kiváltására, vagy ráségítésre alkalmasak. Használatuk segítségével növelhető a teljesítmény, csökkenthető a fáradékonyság és ebből következően a balesetek és káresemények száma is jelentősen visszaszorítható. Kutatási eredményeink bemutatásával elő kívánjuk segíteni az eszközök elterjedését, szélesebb körben történő alkalmazását, valamint a további fejlesztéseket.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] James O'Brien: Exoskeletons, The Augmented Future of the Human Body, URL: <https://mashable.com/2013/02/25/exoskeletons-future/#Fi7KgCyRNZqR> (letöltve: 2018. 02. 12.)
- [2] Bobby Marinov: 19 Military Exoskeletons into 5 Categories, URL: <http://exoskeletonreport.com/2016/07/military-exoskeletons> (letöltve: 2018. 02. 12.)
- [3] Daniel M. Baechle: A mobile arm exoskeleton for firearm aim stabilization, 76 p. URL: http://udspace.udel.edu/bitstream/handle/19716/12638/Daniel_Baechle_thesis.pdf?sequence=1 (letöltve: 2018. 02. 12.)
- [4] Li, Y., Guan, X. and Xu, C.: Optimization of the Control Scheme for Human Extremity Exoskeleton. Journal of Vibroengineering. Vol. 18, Issue 8, 2016. pp. 5432-5439.
- [5] Kazerooni, H, Racine, J. L., Huang, L. and Steger, R.: On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, 2005. pp. 4364-4371.
- [6] Huang, L., Steger, J. R., Kazerooni, H.: Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). Proceedings of the IMECE 2005 Congress, Orlando. pp. 1-7.