

Egzoskeleti

Gde, kada i koliko nam zaista mogu pomoći

Svemir Popić¹, Gorana Popić²,

¹Centar za robotiku, Institut Mihajlo Pupin, ²doktor medicine
Beograd, Srbija

svemir.popic@pupin.rs; gorana.popic@gmail.com;

Sažetak— Još pre skoro pedeset godina u Institutu Mihajlo Pupin u Beogradu napravljeni su prototipovi egzoskeleta čija je prevashodna namena bila pomoć obolelim. Analizirano je nekoliko tipova sa različitim vrstama pogona na kojima su testirane različite upravljačke teorije od kojih je najpoznatija Teorija Tačke Nula Momenta (ZMP) koja se i danas u velikoj meri koristi kod upravljanja savremenim humanoidnim robotima. Iako im je prvobitna namena bila omogućavanje kretanja osoba vezanih za invalidska kolica, u novije vreme određeni modeli dobijaju na značaju kao pomoć kod obavljanja teških manipulativnih radnji, a na žalost postoje primeri i njihove vojne primene. Težište je bačeno i na uočavanje razlika nekadašnjih i savremenih modela po pitanju: U čemu se i koliko razlikuju od savremenih modela.

Ključne reči: egzoskeleti, ZMP, humanoidni roboti, aktivni mehanizmi

I. UVOD

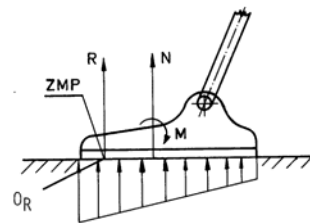
Izvorno, egzoskelet predstavlja spoljašnji kostur koji potpuno ili dodatno učvršćuje unutrašnju strukturu organizma. Ako ta unutrašnja struktura, skelet ili endoskelet nije dovoljno moćna ili je dodatno oslabljena usled nastalih oboljenja ili trauma, potrebno ju je osnažiti. To je moguće učiniti samo sa spoljašnje strane. Imobilizacija povreda ili lomova predstavlja način spoljašnjeg ukrućenja na pasivan način. Ali, ako je potrebno omogućiti ili pojačati kretanje jednog ili više lokomotornih organa (pre svega ruku ili nogu) ili celog tela, onda je korišćenje egzoskeleta jedan od načina. U tom smislu mogu postojati parcijalni egzoskelti (ortoze ruku, nogu, ...) ili kompletni egzoskelti koji ojačavaju celo telo. Istorijski gledano, egzoskeleti su se pojavili prevashodno sa namerom pomaganja osobama sa neuromišićnim oboljenjima. Međutim, poslednjih godina sve više se potencira razvoj egzoskeleta kao pomoćnog sredstva pri obavljanju težih fizičkih poslova [1]. Takođe, egzoskeleti su pronašli primenu i u vojnoj industriji – npr. Bleex [2] – čijom se primenom značajno povećavaju performanse vojnika na ratištu, pre svega u olakšanju dugotrajnog nošenja velikih terata.

U Institutu Mihajlo Pupin u Beogradu, prof. Mimir Vukobratović sa saradnicima je već krajem šezdesetih godina prošlog veka uočio da se jednom broju pacijenata, sa oboljenjima tipa paraplegije ili nekih oblika mišićne distrofije, može pomoći ako se na njihovo onemoćalo telo sa spoljašnje strane navuče uređaj čija će funkcija biti da mehaničkim putem omogući izvođenje pokreta, što je moguće približnije

kretanju zdravih osoba. Pritom, takav mehanički uređaj ni u kom pogledu ne sme da povredi ili dodatno naruši integritet obolelog. Tokom istraživanja koje je potrajalo više od dve decenije razvijeno je nekoliko tipova uređaja. Analizirana su različita konstruktivna rešenja uređaja, pre svega prema izvoru energije za pogon izvršnih organa, zatim prema broju stepeni slobode koji su bili u direktnoj vezi sa osnaženim zglobovima pacijenta, ali uz poštovanje kinematičkih i dinamičkih uslova za ostvarenje dinamičkog kretanja.

Nekako u isti vreme sa razvojem egzoskeleta pojavili su se i prvi radovi Vukobratovića, Juričića i Stepanenka koji su matematički izračunavali dinamiku čovekovog kretanja čime je utrput razvoju teorije o stabilnosti čovekovog kretanja (Tačka Nula Momenta – ZMP). Paralelno sa povratnom spregom stanja sistema, uključujući povratnu spregu po silama, kod osnaženih zglobova hodajućih robota, a posebno dvonožnih mehanizama, za Dinamičku stabilnost celog sistema od posebne važnosti je upravljanje silama reakcije podloge u kontaktu sa stopalima.

Na primer, kod dvonožnih robota, u jednoosloničkoj fazi (Sl. 1.), moguće je sve elementarne vertikalne sile zameniti njihovom rezultantom. Neka tačka O_R predstavlja tačku za koju je suma momenata jednaka nuli i u kojoj jedina delujuća sila je rezultatna sila R . Ta tačka je nazvana Tačkom Nula Momenta (TOM) ili kako je u engleskoj terminologiji usvojeno ZMP (Zero Moment Point) [3-6].



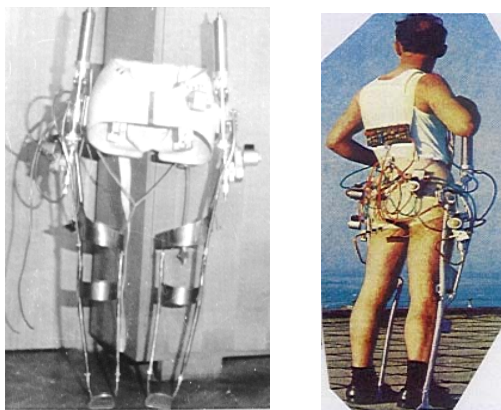
Slika 1. Raspodela opterećenja duž stopala

Jednačine Dinamičke stabilnost za dvonožne mehanizme se onda izvode na bazi ZMP. Tako je bilo moguće rešiti veoma specifičan problem primenjene mehanike. Naime, za svaku tačku osim ZMP jednačine Dinamičke stabilnosti sadrže nepoznate dinamičke reakcije tako da je onda nemoguće rešiti probleme dinamičkog modeliranja hodajućih, a posebno dvonožnih robota. Ali ako jednačine napišemo za ZMP, onda

se sile reakcije mogu izračunati jer one tada zavise od svih unutrašnjih koordinata, brzina i ubrzanja celokupnog mehanizma.

Sledeći ključni korak u modeliranju i upravljanju hodajućim, a posebno dvonožnim robotima, bilo je korišćenje tzv. poluinverzne metode [4-7]. Postavlja se pitanje: Šta je to značajno za ovu metodu? Uslovi Dinamičke stabilnosti za koordinatni sistem koji je lociran u ZMP uspostavljaju tri relacije između generalisanih koordinata i njihovih izvoda. Pošto celi sistem ima n stepeni slobode kretanja (DOF) ($n > 3$), onda trajektorije od $(n-3)$ koordinata se mogu propisati tako da obezbede dinamičku ravnotežu celokupnog sistema (uključujući trup i ruke kod dvonožnih sistema). Ako bi postojao neki dodatni ZMP (kao što su npr. Pasivni zglobovi ruku bipeda – dvonožnog mehanizma tj. robota), onda se za svaki dodatni ZMP mogu uvesti dodatna tri uslova ravnoteže. Zbog toga, kada se primeni na problem izučavanja dinamike dvonožnih sistema, kretanje segmenata je delimično poznato, pošto su nepoznati momenti jednaki nuli.

Aktivni (osnaženi) humanoidni mehanizmi razvijeni su, po prvi put u svetu, u Laboratoriji za robotiku, Instituta Mihajlo Pupin u Beogradu, kasnih šezdesetih. Tada se pojavio prvi u svetu aktivni eksperimentalni egzoskelet sa pneumatskim pogonom koji je omogućavao veštačko koračanje tj. izvršavao je tzv. "klizajući" korak gde se stopalo gotovo da nije odvajalo od podloge (Sl.2). Najuspešniji primerak aktivnog egzoskeleta za rehabilitaciju paraplegičara i slično hendikepiranih osoba, sa penumatskim pogonom i elektronski programiranim kretanjem konstruisan je i realizovan [8-11] u Beogradu (Sl. 3) gde je uspešno ispitivan na Ortopedskoj klinici 1972. godine. Jedan primerak je isporučen Centralnom institutu za Traumatologiju i Ortopediju u Moskvi u okviru SSSR – SFRJ međudržavne naučne saradnje. Od 1991. godine ovaj egzoskelet predstavlja osnovnu postavku Muzeja Politehnike u Moskvi i uključen je u listu Muzejske zbirke Ruske federacije kao relikvija nauke i tehnologije za buduće generacije.



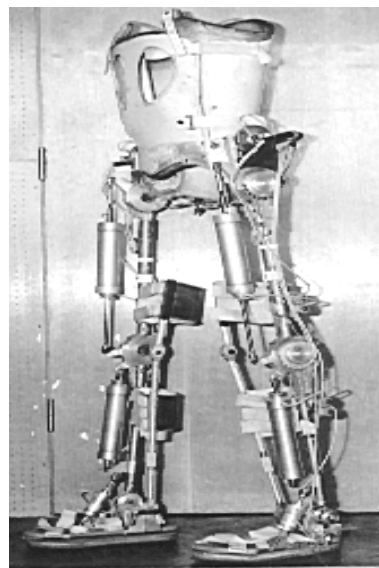
Slika 2. Prvi u svetu aktivni egzoskelet za hod, sa penumatskim pogonom, delimično kinematički programabilan, za izvršavanje kvazi-antropomorfno koračanja. Realizovan je 1969. Bio je preteča mnogo složenijih egzoskeleta za osobe sa veoma složenim hendikepima

Ovaj prvi pneumatski pogonjeni egzoskelet imao je samo po jedan stepen slobode kretanja koji se nalazio u zglobu kuka. Pomeranje kolena omogućeno je kinematičkom vezom tj.

spregnutim pomeranjem jer je ne bazi prethodno izvršenih merenja za određeni tip kretanja izračunata zavisnost pomeranja kolena od pomeranje kuka. U skočnom zglobu je postojao samo pasivni cilindrični zglob. Ovo su svakako bili prvi egzoskeleti na svetu na kojima su testirana kretanja. Da bi to u ovom slučaju bilo moguće, a da ne bi došlo do trenja noge koja se pomera u odnosu na onu koja je oslonjena, pomeranje je bilo jako usporeno sa blagim naginjanjem tela u stranu oslone noge kao bi se obezbedio dovoljan prostor za prenos noge koja se pomera tj. za izvršenje tzv. polukoraka. Da bi se konstrukcija što je moguće više olakšala, radni pneumatski cilindri dvostranog dejstva kao i akumulatori udara su rađeni u sopstvenoj proizvodnji (nestandardni) od tankozidne čelične cevi, dok su glave cilindara rađene od duralumijuma. Upravljanje cilindrima, a time i kretanjem obezbeđivano je pomoću elektromagnetnih ventila.

II. DOSADAŠNJA REŠENJA

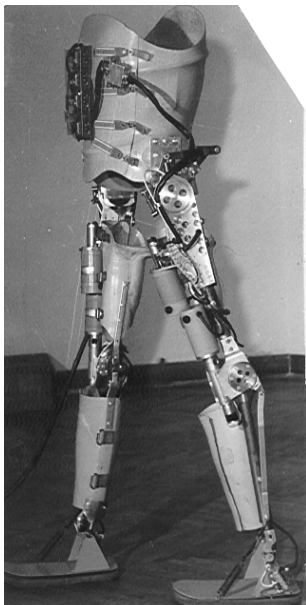
Početni rezultati postignuti tokom ispitivanja nagovestili su i sugerisali izradu narednog složenijeg modela kod kojeg su noge imale po tri stepena slobode (za svaki zglob posebno) plus stepen slobode od lateralne kompenzacije kretanja. Ovaj model prikazan na Sl. 3. pojavio se 1972. godine i detaljno je testiran na Ortopedskoj klinici u Beogradu. Da bi se olakšala konstrukcija i ovde su svi cilindri izrađeni u sopstvenim radionicama, pri čemu su primenjeni rezultati i saznanja dobiveni prilikom testiranja prvog prototipa.



Slika 3. Prvi u svetu aktivni egzoskelet sa pneumatskim pogonom – elektronski programiran, bio je klinički ispitivan na osobama sa paraplegijom i sličnim obolenjima. Napravljen je 1972. godine, a iste godine je i klinički ispitivan na Ortopedskoj klinici u Beogradu.

Kao podatak može poslužiti to, da su ti specijalno konstruisani cilindri, bili teški svega 0.5 kg a proizvodili su silu od skoro 1500 N pri pritisku vazduha od 10 bara. Iako je zadatak bio izrada egzoskeleta, tokom razvoja sistema razvijani su i drugi elementi neophodni za bezbednu primenu uređaja. Tako npr. pokazano je da se najbolji rezultati zaptivanja vazduha postižu pomoću teflonskih manžeta, dok je kod primene O prstenova ubrzo po početku upotrebe dolazilo

do curenja. Takođe eksperimentisano je sa različitim vrstama maziva koja daju najbolje rezultate kod odnosa padmazivanje –zaptivanje. Istovremeno su analizirani i različiti gasovi: vazduh, ugljen–dioksid, azot i azotni oksid. Iako su najbolji rezultati postignuti sa ugljen – dioksidom zbog problema sa regulatorima pritiska, u daljim istraživanjima je korišćen vazduh. Tokom ispitivanja korigovana je konstrukcija tj. olakšana, a primenom savremenijih metoda upravljanja i novije elektronike, potrebni pritisak je snižen na 6-7 bara.



Slika 4. Aktivni egzoskelet sa elektromehaničkim aktuatorima, elektronski programiran, napravljen je i testiran 1974. godine. Korišćen je kao uređaj za razvoj i evaluaciju elektromehaničkih pogona za aktivne ortotičke uređaje i aktivne ortoze ruku.



Slika 5. “Aktivno odelo” (meko odelo) je bio modularni polu-aktivni uređaj namenjen distrofičarima. Napravljen je 1978. godine. Imao je elektromotorni pogon i savremeno mikroprocesorsko upravljanje. Prodat je Rehabilitacionom centru u Hjustonu, Teksas, USA sa ciljem daljeg razvoja i unapređenja.



Slika 6. Aktivna ortoza ruke sa elektromehaničkim pogonom - namenjena osobama sa mišićnom distrofijom. Napravljena je 1982. godine

Ortoza ruke je nastala kao poseban tip egzoskeleta namenjenog pacijentima sa uznapredovalom mišićnom distrofijom kojom su medicinski uslovi (odsustvo spazama itd.) omogućavali korišćenje uređaja. Ortoza ruke je imala 3 stepena slobode i to jedan u ramenu i dva u laktu i oni su pacijentu (Sl. 6.) omogućavali izvršenje nekih osnovnih potreba (uzimanje hrane, češljanje i sl.). Ovim malim visokobrzinskim DC motorima, sa posebno konstruisanim minijaturnim cilindričnim i pužnim reduktorima, upravljalo se pomoću male palice – tzv. džojstika koji je pomeran prstima druge ruke. Naime, pokazano je da se kod toka bolesti zadržava u prstima rezidualna snaga, dovoljna za pokretanje poluge džojstika, a time i pomeranja ortoze ruke. Inače sama ortoza je bila montirana na naslon (ram) invalidskih kolica, dobijala je napajanje od priloženog akumulatora, a jednostavno se montirala na obolelu ruku pomoću čičak traka. Na žalost, prerana smrt pacijenta označila je i prevremeni završetak istraživanja u ovoj oblasti.

III. NEKA SVETSKI POZNATA REŠENJA

Mnogo je pokušaja u svetu, pogotovo u poslednje vreme, da se napravi uređaj koji će ne samo pomagati bolesnim, nego i zdravim i olakšati im fizička opterećenja. Egzoskelet kompanije PanasonicAWN – 03 (Sl. 7) je uređaj za koji se kaže da potpomaže podizanje i premeštanje terete do 15 kg. U njega su ugrađena 2 AC motora u kukovima i pokreće ih struja dobivena iz Li-Ion baterija napona 48.1 V koje se nose na leđima. Masa uređaja je oko 6 kg bez baterija i uprtača, a radni režim oko 8 sati. I bez obzira što se na prospektom filmu vidi kako radnici s lakoćom manipulišu pomenutim teretima, relaksirajući pre svega strukturu i mišiće kičme, a na osnovu naših ranijih iskustava nastalih tokom ispitivanja motorne natkolene proteze Promona – 2 (IMP Beograd) pre više od 15 godina, sam balast, koji se stalno nosi, ne daje nam veliku nadu u ovakav uređaj, ma koliko baterije bile “lake” i savremene. Pacijent koji je testirao natkolenu protezu nosio je takodje na leđima NiCd baterije mase oko 2 kg koji su samo jednom motoru obezbeđivali autonomiju od sat vremena, i on se već posle tog sata osećao prilično umornim, tako da je malo verovatno da se i pored savremene tehnologije dobijaju neki značajniji rezultati [12].



Slika 7. Panasonicov egzoskelet AWN-03

Egzoskelet “Feniks” (Sl. 8) je takođe pokušaj da se sa dva motora u kuku reši problem koračanja. Težine od samo 12.25 kg omogućava kretanje brzinom od oko 1.7 km/h sa autonomijom od oko 4 sata, a uz odmor i do 8 sati. Međutim, to opterećenje je kako tako vezano za pacijenta, tako da je potrebno uložiti određeni napor u svrhu stabilizacije mase kako pacijenta tako i mehanizma. Dodatni oslonci u štakama u čijim se ručicama nalaze i određene komande koje potpomažu upravljanju su neophodni za dodatnu stabilizaciju kretanja (i psihološku) ma kako ono bilo usporeno. Moguće je da uređaj ima neke rehabilitacione osobenosti, ali pomeranja pacijenta iz mesta u mesto iziskuje popriličan napor i prihvatljiviji je za pacijente sa snažnijim rukama i torzom [13].



Slika 8. Egzoskelet “Feniks” firme SuitX

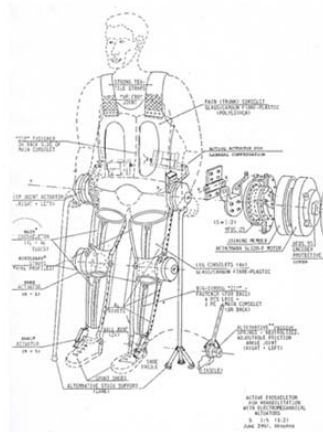


Slika 9. Egzoskelet u razvoju za velike terete [2], [14]

Egzoskelet (Sl. 9) razvijan je za vojne namene u sklopu programa DARPA. Namena mu je da vojniku omogućí nošenje velikih tereta na duge staze bez dodatnog opterećenja, jer se sav korisni teret prebacuje na konstrukciju okvira - “korseta” koji ima sopstveni pogon, računarski se prati i obezbeđuje stabilnost, a korisnik koji je pre svega zdrava i utrenirana osoba predstavlja sistem za navođenje motorizovanog mehanizma. Više o ovom uređaju može se detaljno pročitati u [2]. Ono što su projektanti ovog sistema uočili je da korišćenje elektromotornih pogona zahteva veliku potrošnju električne energije, samim tim i velike balastne akumulatore, koji ma kako bili savremeni, i svakim danom sve manji i lakši, još uvek ne pružaju dovoljnu autonomiju kretanja, a ako se pritom krećete u slobodnom prostoru, bez mogućnosti dopune, ograničenja su velika. Zbog toga je projektovan sistem sa hidrauličnim pogonom koji daje značajno veće snage uz uštedu mase, a pogonska energija za pumpe i razvodnike dobija se iz malog motora sa unutrašnjim sagorevanjem koji je deo konstrukcije. Nekoliko litara goriva ne predstavlja veliku dodatnu masu, ali pruža značajnu autonomiju. Jedini problem može da predstavlja buka koja se stvara pri radu motora i koju je nemoguće potpuno prigušiti, a nisu na odmet ni izduvni gasovi ma kako oni bili redukovani. Zbog toga je upitna primena ovog egzoskeleta u realnim uslovima, npr. na ratištu.

IV. SKICE NEKIH IDEJNIH REŠENJE

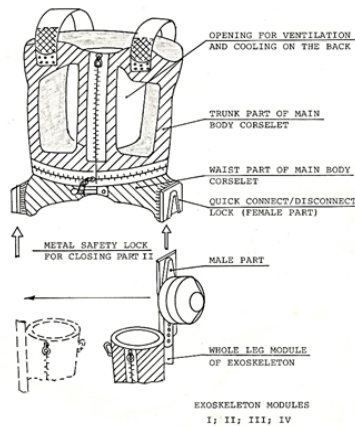
Pre dvadeset godina u Institutu Mihajlo Pupin u Beogradu ponovo je pokrenuta inicijativa za projektovanje i izradu egzoskeleta na električni pogon na kojem bi bile primenjene savremenije upravljačke tehnike i iskorišćeni moderniji pogonski sistemi, senzori kao i drugi konstruktivni i ortopedski materijali u odnosu na prethodna rešenja. Takav jedan egzoskelet, modularnog tipa, prikazan je na Slici 7.



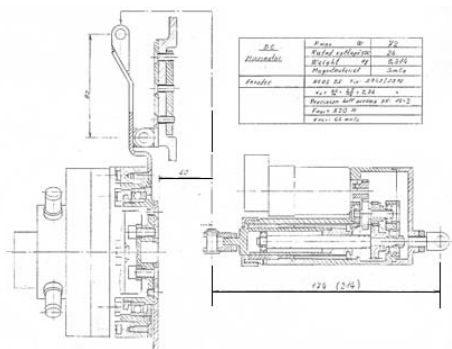
Slika 7. Idejno rešenje novog egzoskeleta na električni pogon

Osnovu modularnog rešenja predstavlja ojačani korset koji se na pogodan način navlači i učvršćuje na telo pacijenta, a na njega se onda dodaju ostali elementi. Zglobovi kuka i kolena rešeni su sa pločastim (pan cake ili flat) motorima i Harmonic Drive reduktorima, dok se merenje položaja obezbeđuje preko

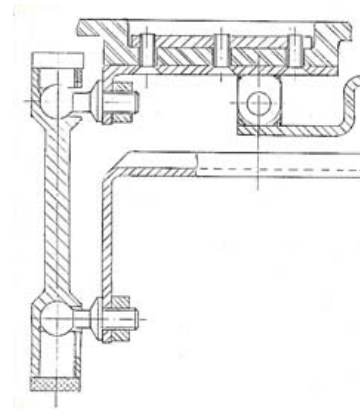
spregnutog HEDS optičkog inkrementalnog enkodera. Ovakva konstrukcija je predložena da bi se što je moguće više smanjila bočna širina egzoskelata. Što se tiče skočnog zgloba tu su predložena tri rešenja i to sa pločastim motorom i HD reduktorom, sa linearnim aktuatorom tipa motor-kuglično navojno vreteno i pasivno rešenje. U odnosu na neke druge egzoskelete poznate u svetu, ovaj egzoskelet je imao aktivnu lateralnu kompenzaciju (otklon od vertikalne ose levo i desno u pravcu kretanja) što bi doprinosilo boljoj antropomorfности kretanja. Uostalom, takvo rešenje je postojalo i kod prvih Pupinovih egzoskeleta. Na Slici 8. predstavljen je izgled novog tipa korseta. Prema zahtevima on je kao glavni noseći element cele konstrukcije morao da se lako navlači na pacijenta tako da ga u krajnjem slučaju i sam pacijent samostalno koristi, naravno, zavisno od njegovih ostalih psiho-fizičkih mogućnosti. Predviđena je izrada na bazi novih – lako obradivih – materijala ojačanih staklenim ili ugljeničnim vlaknima, posebno na mestima pojačanih naprezanja. Karlični pojas je dodatno ojačan radi veze sa pogonima i radi ugradnje pouzdanih brzo rastavljivih spojnica. Kao što je naznačeno, konstrukcija je zamišljena kao modularna i prilagođena svakom potencijalnom pacijentu. Korset kao i ulošci – ojačanja natkolenice i potkolenice se izrađuju u ortopedskoj ustanovi i prilagođeni su korisniku. Veličine pogonskih motora i reduktora se takođe biraju prema dinamičkom proračunu koji se radi prema zahtevima za svakog pacijenta ponaosob.



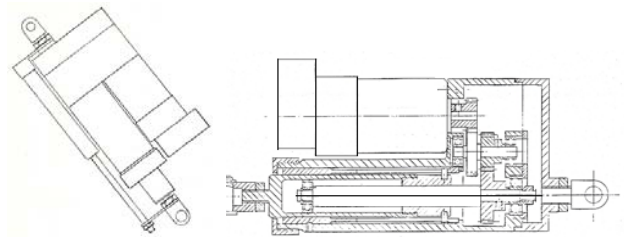
Slika 8. Idejno rešenje novog korseta



Slika 9. Crteži aktuatora (levo: disk motor sa HD reduktorom i enkoderom kao i veza sa ortopedskim delovima – desno: linearni aktuator za lateralnu kompenzaciju i skočni zglob tipa DC motor, kuglično navojno vreteno i optički enkoder)



Slika 10. Crtež rešenja lateralne kompenzacije



Slika 11. Crteži linearnih aktuatora (levo: sa linearnim potenciometrom, desno: sa optičkim enkoderom)

V. ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog može se reći sledeće: Iako je prošlo toliko vremena ništa se drastično nije promenilo u odnosu na pionirska rešenja. Primena novih materijala, procesora pa i upravljačkih algoritama nije donela nešto što bi bilo opšte primenljivo u realnim uslovima. Samim tim što ne postoji neka, iole serijska, proizvodnja ovakvog pomagala, u bilo kojoj varijanti, bilo kao pomoć obolelima ili pojačanje snage zdravima, još uvek se nalazimo u oblastima sporadičnih, više ili manje uspešnih modela. Kada se masa koju podižete ili nosite prenese na spoljašnju strukturu egzoskeleta pri čemu vase telo samo prenosi komande njegovom pogonskom sistemu onda praktično nema ograničenja u masi terete koju podižete (naravno postoji proračunsko ograničenje noseće strukture), ali ostaje trajno pitanje koliko dugo to možemo da činimo jer još uvek ne postoji idealan izvor napajanja i to je, za sada, konačno ograničenje. Masa pogonskih motora bez obzira na način proizvodnje obrtnog momenta nije se drastično promenila. Primena HD reduktora je značajno smanjila masu reduktora ali i podigla cene. Primena ugljeničnih vlakana je takođe znatno olakšala noseću konstrukciju – oklop, novi procesori pa i algoritmi su doneli značajne prednosti i donose ih svakim danom, ali generalno upoređujući sa Pupinovim rešenjima, koja su pre svega bila veoma napredna idejna rešenja tog vremena, nema velikih pomaka, bar u pogledu primene. Uporedimo! Pneumatski pogon nekad – sada hidraulični. Pneumatika je bila raspoloživa, jeftina i mogli ste neograničeno da je koristite u zatvorenom prostoru rehabilitacione ustanove. Odmah je

uočen problem sa velikim brojem motora koji povećavaju antropomorfnost kretanja, ali, nažalost, i masu. Zato su dva pomenuta rešenja (od serije sličnih) urađena sa po dva motora, kao i naše polazno rešenje. Meko odelo za izgubljenu snagu mišića nije ništa drugo do egzoskelet za pomoć zdravim u manipulisanju teškim teretima. Konačno, do pronalaska nekih drugih načina dobijanja energije pojavljivaće se razne, estetski vrlo prihvatljive konstrukcije, pa zato proizvođači invalidskih kolica još uvek nisu izgubili bitku u transportu obolelih.

ZAHVALNICA

Rad je napisan pod okriljem projekata TR-35003, III-44004, III-44008 finansiranih od Ministarstva za obrazovanje i nauku Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] http://www.b92.net/biz/vesti/svet.php?yyyy=2016&mm=03&dd=24&nav_id=1111451.
- [2] Siciliano, Khatib, Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, ISBN: 978-3-540-23957-4
- [3] M. Vukobratovic and D. Juricic, "A Contribution to the Synthesis of Biped Gait", IFAC Symp. Technical and Biological Problem of Control, Yerevan, USSR, 1968.
- [4] M. Vukobratovic and D. Juricic, "Contribution to the Synthesis of Biped Gait", IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol. 16, No 1, 1969.
- [5] M. Vukobratovic and Yu. Stepanenko, "On the Stability of Anthropomorphic Systems", Mathematical Biosciences, Vol. 15, pp. 1-37, 1972.
- [6] D. Juricic and M. Vukobratovic, "Mathematical Modeling of a Bipedal Walking System", ASME publication 72-WA/BHF-13, Winter Annual Meeting, New York, Nov. 26-30, 1972.
- [7] M. Vukobratovic, "How to Control Artificial Anthropomorphic Systems", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, Sept. 1973.

- [8] M. Vukobratovic, D. Hristic and Z. Stojiljkovic, "Development of Active Anthropomorphic Exoskeletons", Medical and Biological Engineering, Vol. 12, No. 1, 1975.
- [9] M. Vukobratovic, D. Hristic, V. Ciric, M. Zecevic, "Analysis of Energy Demand Distribution with in Anthropomorphic Systems", Trans. of the ASME, Series G Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 95, No 4, 1973.
- [10] M. Vukobratovic, D. Hristic, Z. Stojiljkovic, "Development of Active Anthropomorphic Exoskeletons", Medical and Biological Engineering, Vol. 12, No 1, 1974.
- [11] M. Vukobratovic, D. Hristic, "Active Orthoses of Lower Extremities", Orthopedic Technic, No 4, 1985.
- [12] https://www.b92.net/biz/vesti/svet.php?yyyy=2016&mm=03&dd=24&nav_id=1111451; <http://exoskeletonreport.com/product/awn-03/>
- [13] https://www.b92.net/zdravlje/vesti.php?yyyy=2016&mm=02&nav_id=1094606
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/HAL_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/HAL_(robot))

ABSTRACT

Almost fifty years ago, in the Mihajlo Pupin Institute in Belgrade engineers have made prototypes of exoskeletons whose purpose was to help in rehabilitation of sick persons. Several types of them with different types of drives have been analyzed, on which different control theories are tested. The most famous of which is the Zero Moment Point (ZMP), which is still widely used today for the control of modern humanoid robots. Although their original purpose was to facilitate the movement of wheelchair people, more recent models are gaining importance in helping to perform serious manipulative actions, and unfortunately there are examples and their military applications. The focus is also on identifying the differences between former and contemporary models in terms: In what way and how much they are different from modern models.

EXOSCELETONS

Svemir Popić, Gorana Popić