

Utvrđivanje ustrojstva egzo-skeletnog sustava za donje udove

Šimunić, Maja

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:720025>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Maja Šimunić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Aleksandar Sušić, dipl. ing.

Student:

Maja Šimunić

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Aleksandru Sušiću na korisnim savjetima, strpljenju i pruženoj podršci tijekom izrade ovog rada.

Hvala kolegama i prijateljima na podršci, prijateljstvu i pomoći tijekom studija i na uspomenuama koje smo zajedno gradili. Učinili ste moje studiranje ljepšim.

Posebne zahvale upućujem svojim roditeljima bez kojih ne bih mogla postići ovoliki uspjeh, te obitelji, sestri i dečku Hrvoju na pruženoj podršci tijekom cijelog studija.

Maja Šimunić



ŠVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 21 - | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Maja Šimunić**

JMBAG: 0035203561

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utvrđivanje ustrojstva egzo-skeletnog sustava za donje udove**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determining the structure of the exoskeletal system for the lower limbs**

Opis zadatka:

Napredak sustava uzorkovanja i analize električnih impulsa svojstvenih mišićnim i moždanim aktivnostima otvara mnoštvo novih i neistraženih mogućnosti primjene u medicini, vojsci i industriji. Također, razvoj i napredak u području primjene mnogih tehnoloških rješenja omogućio je ljudima s paralizom novu kvalitetu življenja, gdje se kao vrlo prosperitetna pokazala primjena BCI (sučelje mozak-računalo). Unatoč dosadašnjim postignućima i potencijalima u primjeni, još uvijek se traže tehnička poboljšanja koja bi ljudima s nekim stupnjem paralize omogućila unaprjeđenje kvalitete življenja točnije kretanja. Do sada se uglavnom primjenjivao neki od dostupnih sustava upravljanja invalidskim pomagalicama (uključujući i BCI), među kojima se BCI upravljanje egzo-skeletima smatra najperspektivnijim, što vrijedi i za primjenu na druge aktivne proteze. Cilj rada je utvrditi optimalni ustroj egzo-skeletnog sustava za donje udove ljudi s paralizom odnosno primarno onih s paraplegijom, uz očekivanje da će upravljanje biti ostvareno putem BCI-a i komplementarnih tehnologija.

U radu je potrebno:

- Prikazati i komentirati neophodne elemente ustrojstva egzo-skeletnog sustava za donje udove;
- Izvršiti analizu tržišta egzo-skeleta i patenata s kritičkim osvrtom na mogućnost povezivanja s BCI-em;
- Utvrditi sve konstrukcijske zahtjeve egzo-skeleta kao i sustava u cjelini te istražiti mogućnosti primjene i povezivanja svih komplementarnih „biofeedback“ tehnologija koje su na raspolaganju;
- Izvršiti konstrukcijsku razradu egzo-skeletnog sustava za donje udove te predložiti konstrukcijsko rješenje;

Opseg izrade tehničke dokumentacije dogovoriti tijekom izrade rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. rujna 2021.

2. prosinca 2021.

13. – 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Aleksandar Sušić


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| POPIS KRATICA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. RAZVOJ EGZOSKELETA..... | 2 |
| 2.1. Patent Nicholasa Yagna | 2 |
| 2.2. Pedomotor Leslieja C. Kelleyja | 3 |
| 2.3. Egzoskelet instituta Mihajlo Pupin | 4 |
| 2.4. ReWalk..... | 5 |
| 2.5. RexBionics | 7 |
| 2.6. HAL | 8 |
| 2.7. Mindwalker | 9 |
| 3. SUČELJE MOZAK - RAČUNALO (BCI) NA EGZOSKELETU DONJIH UDOVA ... | 12 |
| 3.1. Vrste BCI sustava..... | 12 |
| 3.2. Komunikacijski protokol..... | 14 |
| 3.3. Komponente sustava | 14 |
| 3.4. Bežična veza između BCI sustava i egzoskeleta | 16 |
| 3.5. Nosivi senzori | 18 |
| 3.6. SIAT egzoskelet donjih udova..... | 21 |
| 4. PRETRAŽIVANJE PATENATA | 25 |
| 4.1. PATENT 1: EP3225363B1 | 25 |
| 4.2. PATENT 2: CN104797385B | 26 |
| 4.3. PATENT 3: CN103932870B | 27 |
| 4.4. PATENT 4: CN109044742B | 27 |
| 4.5. PATENT 5: US11071675B2 | 28 |
| 5. KONSTRUKCIJSKA RAZRADA..... | 30 |
| 5.1. Tehnički upitnik | 30 |
| 5.2. Definicija cilja..... | 31 |
| 5.3. Definiranje zahtjeva | 32 |
| 5.4. Funkcijska struktura i model relacija | 34 |
| 5.5. Morfološka matrica | 37 |
| 5.6. Generiranje koncepata..... | 39 |
| 5.7. Vrednovanje koncepata..... | 44 |
| 5.8. Razrada koncepta | 45 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 55 |

| | |
|-----------------|----|
| LITERATURA..... | 57 |
| PRILOZI..... | 59 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Patent Nicholasa Yagna [2] | 2 |
| Slika 2. | <i>Pedomotor</i> . 2.a prikazuje bočni prikaz umjetnog ljudskog egzoskeleta. 2.b prikazuje stražnji prikaz umjetnog ljudskog egzoskeleta. [2] | 3 |
| Slika 3. | Egzoskelet instituta Mihajlo Pupin [2] | 5 |
| Slika 4. | Shema <i>ReWalk</i> egzoskeletnog sustava [3] | 6 |
| Slika 5. | <i>ReWalk</i> [2] | 6 |
| Slika 6. | Egzoskelet REX [5] | 7 |
| Slika 7. | Egzoskelet HAL [2] | 8 |
| Slika 8. | 3 glavna cilja rada <i>Mindwalker</i> egzoskeleta [7] | 10 |
| Slika 9. | <i>Mindwalker</i> [8] | 11 |
| Slika 10. | Koncept rada BCI sustava [1] | 13 |
| Slika 11. | Komponente sistema [10] | 15 |
| Slika 12. | „Biosemi ActiveTwo“ sistem [10] | 15 |
| Slika 13. | A. Klinički podaci, B. Bežični snimač i C. Egzoskelet EMY [11] | 17 |
| Slika 14. | Strategija adaptivnog učenja u stvarnom vremenu [11] | 18 |
| Slika 15. | Primjeri nosivih senzorskih sustava za analizu hoda: a) Otpornici osjetljivi na silu; b) Ploča sile; c) Senzori bazirani na vlaknima; d) Senzor sile temeljen na tlaku; e) Senzor meke sile; f) Xsens jedinica; g) Mikro senzor [12] | 19 |
| Slika 16. | Bluetooth modul [13] | 20 |
| Slika 17. | 6 senzora tlaka u ulošku [13] | 20 |
| Slika 18. | Sustav mjerenja i analize plantarnog tlaka u cipeli [13] | 21 |
| Slika 19. | Egzoskelet SIAT. A: ruksak s kontrolerom i baterijom; B: dio struka; C: dekoderi; D: podesivi segment; E: pregrada koljenog zgloba; F: podesivi segment potkoljenice; G: zglob gležnja; H: nosive cipele; I: DC motor; J: zglob kuka; K: stražnja pregrada; L: zglob koljena [10] | 22 |
| Slika 20. | Senzori egzoskeleta [10] | 22 |
| Slika 21. | Scene internetskog eksperimenta [10] | 23 |
| Slika 22. | Patent 1 [14] | 26 |
| Slika 23. | Patent 5 [18] | 29 |
| Slika 24. | Funkcijska struktura | 35 |
| Slika 25. | Model relacija | 36 |
| Slika 26. | Koncept 1 | 40 |
| Slika 27. | Koncept 2 | 42 |
| Slika 28. | Koncept 3 | 43 |
| Slika 29. | Stupnjevi slobode gibanja | 47 |
| Slika 30. | Sustav pokretanja: a) Izgradnja linearnog aktuatora; b) Poprečni presjek (prerezan u sagitalnoj ravnini) serije elastičnog zgloba; c) A - A presjek iz b) [8] | 48 |
| Slika 31. | Grafički prikaz sustava egzoskeleta | 49 |
| Slika 32. | CAD model cipele: a) Izometrija; b) Tlocrt; c) Bokocrt | 50 |
| Slika 33. | Senzorski modul s IMU sensorima i spoj s cipelom: a) Prikaz senzorskog modula s 8 IMU senzora; b) Tlocrt senzorskog modula s imbus vijcima | 51 |
| Slika 34. | Čičak trake | 51 |
| Slika 35. | Gumeni potplat namijenjen za suhu i ravnu podlogu: a) Izometrija; b) Tlocrt | 52 |
| Slika 36. | Gumeni potplat namijenjen za neravnu podlogu: a) Izometrija; b) Tlocrt | 52 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 37. | Gumeni potplat namijenjen za mokru i klizavu podlogu: a) Izometrija potplata bez krampona; b) Tlocrt potplata s kramponima | 52 |
| Slika 38. | Sklop CAD modela s gumenim potplatom za suhu i ravnu podlogu: a) Rastavljen sklop; b) Sastavljen sklop; c) Bokocrt sklopa | 53 |
| Slika 39. | Sklop CAD modela s gumenim potplatom za neravnu podlogu: a) Rastavljen sklop; b) Bokocrt sklopa..... | 53 |
| Slika 40. | Sklop CAD modela s gumenim potplatom za mokru i klizavu podlogu: a) Rastavljen sklop; b) Bokocrt sklopa..... | 53 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Kontrolne strategije [10] | 24 |
| Tablica 2. Tehnički upitnik [19]..... | 30 |
| Tablica 3. Definicije cilja [18] | 32 |
| Tablica 4. Lista zahtjeva..... | 33 |
| Tablica 5. Morfološka matrica | 37 |
| Tablica 6. Vrednovanje koncepata | 44 |
| Tablica 7. Osnovni tehnički zahtjevi | 46 |
| Tablica 8. Rasponi pokretanja zglobova [8]..... | 46 |
| Tablica 9. Vrijednosti osnovnih dijelova modela..... | 54 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-----------------|----------------|
| <i>b</i> | mm | širina |
| <i>f</i> | Hz | frekvencija |
| <i>h</i> | mm | visina |
| <i>l</i> | mm | dužina |
| <i>M</i> | Nm | okretni moment |
| <i>m</i> | kg | masa |
| <i>P</i> | W | snaga motora |
| <i>v</i> | km / h | brzina |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|----------------|--|
| BCI | engl. <i>Brain Computer Interface</i> - Sučelje mozak - računalo |
| BES | engl. <i>Bioelectrical signals</i> - Bioelektrični signali |
| BLDC | engl. <i>Brushless direct current motor</i> - Motor istosmjerne struje bez četkica |
| CAD | engl. <i>Computer - Aided Design</i> - Računalno potpomognuto projektiranje |
| DRNN | engl. <i>Dynamic Recurrent Neural Network</i> - Dinamički ponavljana neuronska mreža |
| ECoG | engl. <i>Epidural electrocorticographic</i> - Epiduralna elektrokortikografija |
| EEG | engl. <i>Electroencephalography</i> - Elektroencefalografija |
| EMG | engl. <i>Electromyography</i> - Elektromiografija |
| EMS | engl. <i>Electrical Muscle Stimulation</i> - Električna stimulacija mišića |
| EOG | engl. <i>Electrooculography</i> - Elektrookulografija |
| FSR | engl. <i>Force sensing resistor</i> - Otpornik za detekciju sile |
| GCF | engl. <i>Ground contact forces</i> - Sile podloge |
| GDP | Dorzifleksija / plantarna fleksija gležnja |
| GEE | Endo / egzo - rotacija gležnja |
| GIE | Inverzija / everzija gležnja |
| HAL | engl. <i>Hybrid Assistive Limb</i> - Hibridni pomoćni ud |
| IMU | engl. <i>Inertial Measurement Unit</i> - Inercijska mjerna jedinica |
| KAA | Ab / addukcija kuka |
| KEE | Endo / egzo - rotacija kuka |
| KoFE | Fleksija / ekstenzija koljena |
| KuFE | Fleksija / ekstenzija kuka |
| LL | engl. <i>Lower limbs</i> - Donji udovi |
| MRI | engl. <i>Magnetic resonance imaging</i> - Magnetska rezonancija |
| NSF | engl. <i>National Science Foundation</i> - Nacionalna zaklada za znanost |
| SAD | Sjedinjene Američke Države |
| SCI | engl. <i>Spinal Cord Injury</i> - Ozljeda leđne moždine |
| SIAT | engl. <i>The Shenzhen Institutes of Advanced Technology</i> - Shenzhen instituti za naprednu tehnologiju |
| SRS | engl. <i>Social Rehab Service</i> - Služba za socijalnu rehabilitaciju |
| SS | Stupanj slobode gibanja |
| SSVEP | engl. <i>Steady-state visual evoked potentials</i> - Stacionarni vizualni evocirani potencijali |
| SWA | engl. <i>Step-Width Adaptation</i> - Prilagodba širini koraka |
| XCoM | engl. <i>Extrapolated center of mass</i> - Ekstrapolirano središte mase |

SAŽETAK

Tijekom posljednjih godina sučelje mozak - računalo (BCI) pojavilo se kao alternativni komunikacijski sustav između ljudskog mozga i izlaznog uređaja. BCI pruža augmentativnu komunikaciju između mozga i izlaznih uređaja, prvenstveno za subjekte koji imaju neuromotorne poremećaje ili traume živčanog sustava, posebno ozljede kralježnične moždine. Pregled identificira potencijale BCI tehnologije zasnovane na elektroencefalografiji (EEG) za kretanje i rehabilitaciju pokretljivosti. Ovim radom teži se ka unaprjeđenju ljudskog egzoskeleta za donje udove sa sučeljem mozak – računalo, konkretno, omogućiti korisniku kretanje i na otvorenom prostoru. Iz tog razloga napravljeno je konstrukcijsko poboljšanje cijele cipele egzoskeleta. Cipelica sadrži sigurnosne remene, senzorski modul i gumeni potplat koji ima mogućnost izmjene, ovisno o kakvoj se podlozi radi. Preoblikovanje samog gumenog potplata čini egzoskelet stabilnijim i sigurnijim za kretanje. Senzorski modul s IMU dodatno osigurava ravnotežu korisnika. Egzoskelet za donje udove najviše se koristi u rehabilitaciji osoba s paraplegijom, a želja je postići i njihovu upotrebu u svakodnevnom životu korisnika. Unaprijeđena cipela predstavlja inovativno rješenje i treba proći testiranja kako bi se mogla koristiti u komercijalne svrhe.

Ključne riječi: egzoskelet, sučelje mozak - računalo, elektroencefalografija, paraplegija, konstrukcijsko poboljšanje cipele

SUMMARY

In recent years, the brain - computer interface (BCI) has emerged as an alternative communication system between a human brain and an output device. BCI provides augmentative communication between the brain and output devices, primarily for subjects with neuromotor disorders or nervous system traumas, particularly spinal cord injuries. The review identifies the potentials of BCI technology based on electroencephalography (EEG) for movement and mobility rehabilitation. This work aims to improve the human lower limbs exoskeleton with a brain - computer interface, particularly to allow the user free movement outdoors. Therefore, a structural improvement of the entire exoskeleton shoe was made. The shoe contains seat belts, a sensor module and a rubber sole that can be changed, depending on the surface. Reshaping the rubber sole itself makes the exoskeleton more stable and safer to move. The sensor module with IMU additionally ensures user balance. Lower limb exoskeletons are mostly used in the rehabilitation of people with paraplegia and the aim is to achieve its daily use. The improved shoe represents an innovative solution and in order to be used for commercial purposes further testing should be done.

Key words: exoskeleton, brain - computer interface, electroencephalography, paraplegia, shoe design improvement

1. UVOD

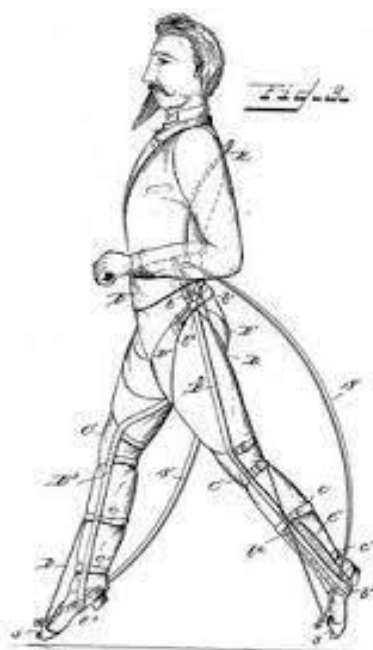
Tijekom posljednjih godina sučelje mozak - računalo (BCI – *engl. Brain Computer Interface*) pojavilo se kao alternativni komunikacijski sustav između ljudskog mozga i izlaznog uređaja. Odgonetnuti intenziteti, nakon otkrivanja električnih signala s ljudskog tjemena, pretvaraju se u naredbe koje se koriste za upravljanje vanjskim uređajima, računalnim zaslonima i virtualnim objektima u stvarnom vremenu. BCI pruža augmentativnu komunikaciju između mozga i izlaznih uređaja, prvenstveno za subjekte koji imaju neuromotorne poremećaje ili traume živčanog sustava, posebno ozljede kralježnične moždine (SCI – *engl. Spinal Cord Injury*) i subjekte s netaknutim senzomotornim funkcijama. Pacijenti bi mogli imati koristi od njegovog napretka radi poboljšanja invalidskih pomagala kao što su nosivi egzoskeleti donjih udova (LL – *engl. Lower limbs*), ortoze, proteze, invalidska kolica i uređaji za pomoćne robote. Pregledane BCI kontrolne paradigme za nosivi LL i pomoćne robote predstavljene su općim kontrolnim okvirom koji se uklapa u hijerarhijske slojeve. Odražava informativne interakcije između korisnika, BCI operatera, zajedničkog kontrolera, robotskog uređaja i okoline. Detaljno se raspravlja o svakom podsloju BCI operatera, ističući metode ekstrakcije, klasifikacije i izvršavanja značajki koje koriste različiti sustavi. Ključne značajke svih aplikacija i njihova interakcija s okolinom pregledavaju se radi prepoznavanja načina rada na temelju elektroencefalografije (EEG – *engl. Electroencephalography*) i prikazuju se kao tablica. Predlaže se strukturiranje EEG - BCI kontroliranih LL pomoćnih uređaja u predstavljenom okviru za buduću generaciju multifunkcionalnih kontrolera temeljenih na namjeri [1]. Potreba za novijom tehnologijom raste, kao i poboljšanjima različitih uređaja pa tako i egzoskeleta. Bioinženjering zahtjeva konstantna istraživanja i testiranja radi uvođenja novijih pomagala u svijet medicine. Postoje brojni segmenti koje je potrebno unaprijediti za dobrobit i sigurnost pacijenata.

2. RAZVOJ EGZOSKELETA

Životinjski svijet ima prirodno razvijen egzoskelet, što je potaknulo čovjeka na razvoj umjetnog egzoskeleta s istom ulogom. Temeljna je funkcija ljudskog egzoskeleta olakšati čovjeku kretanje i obavljanje osnovnih zadaća života. Razvoj egzoskeleta vidljiv je u vojsci, medicini i industriji. Prvi izumi sastojali su se samo od istraživanja i dobivenih koncepata na papiru, no nikad nisu izrađeni [2].

2.1. Patent Nicholasa Yagna

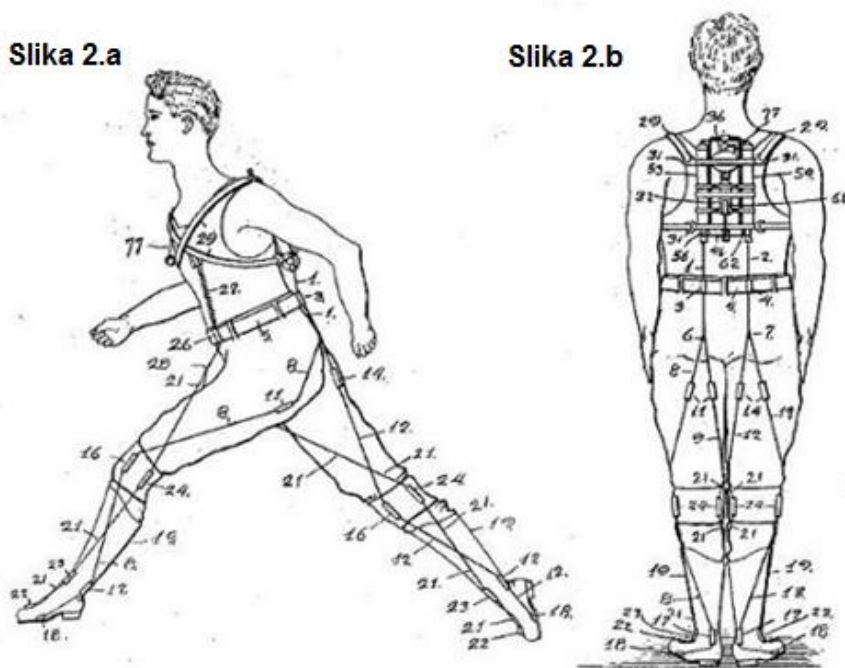
U razdoblju od 1889. do 1890. godine Nicholas Yagn razvija patent umjetnog ljudskog egzoskeleta kao prvi primjer naprave koja ima potpornu ulogu kod hodanja, trčanja i skakanja. Kao posrednik u prijenosu tjelesne težine na podlogu korištene su goleme opruge koje se protežu duž cijelih nogu. Kasnije zamijenjene su vrećama sa stlačenim plinom koje su služile za pohranu energije. Njome je olakšano kretanje čovjeka. Ovakav egzoskelet trebao se koristiti u vojsci kako bi ruski vojnici mogli dulje pješaćiti, a da se pritom toliko ne umaraju te kako bi se čovjeku olakšalo izvođenje određenog pokreta. Naime, ne postoje dokazi da je egzoskelet realiziran [2]. Slika 1. prikazuje prethodno objašnjen egzoskelet.



Slika 1. Patent Nicholasa Yagna [2]

2.2. Pedomotor Leslieja C. Kelleyja

Izum Leslieja C. Kelleyja potencijalni je egzoskelet koji bi služio kao potpora čovjeku kod kretanja. Taj egzoskelet nosi ime *Pedomotor* i sadrži set umjetnih ligamenata u obliku žica postavljениh paralelno s glavnim ljudskim mišićima ekstremiteta. Umjetni ligamenti spajaju se na neki pogonski stroj čije djelovanje ublažava napore mišića prilikom kretanja čovjeka. Ovaj izum koristi vanjski izvor energije koji je zamišljen kao mali parni stroj u obliku ruksaka na leđima čovjeka iako to i nije najbolje rješenje. Izum ovakvog načina pokretanja egzoskeleta uvelike ovisi o načinu rada pogonskog djela što se i dan danas javlja kao glavni problem u razvoju umjetnih ljudskih egzoskeleta. Kao ni izum Nicholasa Yagna, dokazano je da ovaj egzoskelet također nije realiziran pa tako ni primijenjen. Da se i proizveo, njegova bi primjena bila vrlo ograničena na nekoliko unaprijed predviđenih kretanja te bi se čovjek morao prilagođavati uređaju što nikako nije cilj razvoja ovakvih egzoskeleta. Cilj je postići upravo suprotno, a to je da se uređaj prilagođava čovjeku prilikom bilo kakvih pokreta gdje bi egzoskelet mogao prepoznati kretanje nogu i pretvoriti ih u upravljačke signale za upravljanje pogonskim motorima [2]. Slika 2.a prikazuje bočni prikaz potencijalnog egzoskeleta, dok Slika 2.b prikazuje stražnji sklop gdje je vidljiv i tzv. parni stroj kao mali ruksak na leđima čovjeka.



Slika 2. Pedomotor. 2.a prikazuje bočni prikaz umjetnog ljudskog egzoskeleta. 2.b prikazuje stražnji prikaz umjetnog ljudskog egzoskeleta. [2]

2.3. Egzoskelet instituta Mihajlo Pupin

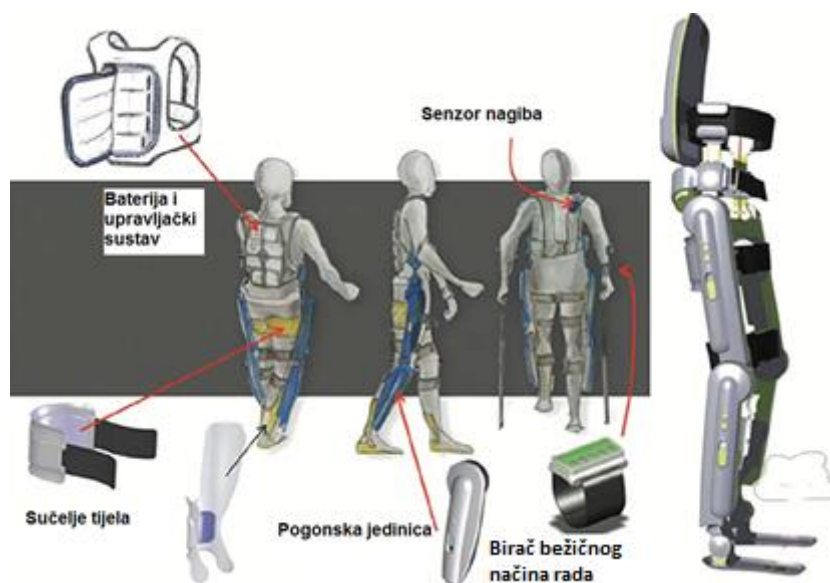
Između 1969. i 1974. godine, Laboratorij za robotiku na Mihajlo Pupin institutu u Beogradu pod vodstvom Miomira Vukobratovića razvija prvi aktivni egzoskelet u svijetu. Ovaj egzoskelet izrađen je u rehabilitacijske svrhe kako bi omogućio pokretanje tijela paraplegičara. Pneumatski pogon i djelomično kinematski programiran, preteča je razvoja složenijih egzoskeleta za pomoć pacijentima s invaliditetom. Razvoj egzoskeleta započeo je kinematski vezanim kukom i koljenom pokretan preko hidrauličnog aktuatora. Godine 1970. hidraulični aktuator zamijenjen je pneumatskim aktuatorom kako bi bilo moguće savijanje zglobova egzoskeleta tj. kuka, koljena i gležnja. Posljednja verzija odnosila se na potpuno aktivni egzoskelet koji je, osim prethodno navedenih zglobova, sadržavao i nadogradnju na torzo. Masa egzoskeleta m od 12 kg ne sadrži masu pogonskog dijela i kontrolnog računala. Tijekom testiranja, preko 100 pacijenata s invaliditetom savladalo je kretanje egzoskeletom pomoću štaka. Ovaj egzoskelet sa Slike 3., sadrži podloške za stopalo s ugrađenim senzorima za praćenje sila reakcije tla kako bi se poboljšala orijentacija egzoskeleta. Daljnjim razvojem pneumatski motori zamijenjeni su električnim motorima radi preciznijeg i elegantnijeg kretanja egzoskeleta. No, baterije i tadašnja nerazvijenost računalne tehnologije predstavljali su veliki problem. Koristeći elektromotore, ovaj egzoskelet smatra se pretečom humanoidnih robota pogonjenih električnim motorima. Testiran je 1974. godine u Hudsonu u Teksaskom Rehabilitacijskom Centru gdje je služio za procjenu i razvoj elektromehaničkih pogona. U rehabilitacijske i istraživačke svrhe, 1978. razvija se uređaj pod imenom „*Active Suit*“ od strane SRS (engl. *Social Rehab Service*) i NSF (engl. *National Science Foundation*). Od 1991. nalazi se u muzeju u Moskvi gdje je prethodno dostavljen Središnjem institutu za traumatologiju i ortopediju u Moskvi.



Slika 3. Egzoskelet instituta Mihajlo Pupin [2]

2.4. ReWalk

ReWalk, prva komercijalno dostupna tehnologija u SAD-u, omogućuje korisnicima invalidskih kolica ponovno stajanje i hodanje, pa čak i penjanje po stepenicama. Prikladan je samo za odrasle osobe s oštećenjem pokretljivosti donjih udova, no zdravih gornjih ekstremiteta kao i zdravog kardiovaskularnog sustava. Sadrži elektromotore na zglobu kuka i koljena, punjive baterije te računalni upravljački sustav smješten u ruksaku. Korisnici *ReWalk* egzoskeleta kontroliraju pokrete kroz kretanje trupa i promjene u težištu tijela. Sadrži senzor nagiba koji služi za signalizaciju upravljačkom sustavu kada treba napraviti sljedeći korak. Sučelje tijela je podesivo. Slika 4. prikazuje shematski prikaz *ReWalk* egzoskeletnog sustava [3].



Slika 4. Shema *ReWalk* egzoskeletnog sustava [3]

Uređaj se lako podešava po visini i širini te ima podstavljena sučelja potkoljenice, natkoljenice i zdjelice. Štike pružaju stabilnost pri stajanju. Sustav sprječava dva uzastopna koraka iste noge. *ReWalk* nudi dvije inačice svog egzoskeleta, od kojih je jedna namijenjena za kućnu upotrebu, a druga za rehabilitaciju invalida u bolnici. No, ovakav uređaj ne mogu koristiti osobe s mišićnom distrofijom i artritisom [3].



Slika 5. *ReWalk* [2]

2.5. RexBionics

Robotski egzoskelet *RexBionics* samonosiv je, nezavisno kontroliran uređaj koji omogućuje osobama s ozljedama leđne moždine, mišićne distrofije i ostalim neurološkim stanjima pomoć pri stabilizaciji u uspravnom položaju. Pritom nema potrebe za dodatnom podrškom fizioterapeuta što omogućuje veći raspon rehabilitacijskih vježbi i pokreta. Može obavljati osnovne funkcije kao što su ustajanje, sjedenje, hodanje, okretanje, penjanje po stepenicama kao i hodanje po ravnim, tvrdim površinama, uključujući rampe i padine. Štake nisu potrebne za balansiranje i stabilnost gornjeg dijela tijela [4]. Korisnici se vežu za robotske noge s brojnim čičak trakama i remenima s kopčama koji pristaju oko nogu zajedno s remenom za pričvršćivanje oko struka korisnika. Ovim egzoskeletom upravlja se pomoću upravljačke palice koja se nalazi u razini struka korisnika. Masa egzoskeleta iznosi 38 kg. Kako bi se produljilo vrijeme rada, baterija se može lako zamijeniti novom, potpuno napunjenom baterijom. Mali i Irving osnovali su tvrtku *Rex Biotics* koja proizvodi REX u Aucklandu na Novom Zelandu. Tvrtka kaže da je REX prikladan samo za korisnike ručnih invalidskih kolica koji mogu sami upravljati ručnim kontrolama [5]. Na Slici 6. prikazan je egzoskelet REX.



Slika 6. Egzoskelet REX [5]

2.6. HAL

Prvo nosivo robotsko odijelo tipa kiborg naziva se HAL (engl. *Hybrid Assistive Limb*) pomoću kojeg se fizičke funkcije korisnika mogu poboljšati i regenerirati. Razvila ga je japanska tvrtka *Cyberdyne*. Korisnik HAL egzoskeleta upravlja vlastitim mislima pomoću mehaničkih dijelova. Prilikom želje za pokretanjem, mozak šalje signal živcima do mišića potrebnih za taj pokret. Brzina signala v , koji se prenose iz mozga do svakog mišića, iznosi između 150 km/h i 400 km/h. Pritom se na površini kože pojavljuje vrlo slab signal koji odražava namjeru nositelja za pokretanjem. Koristeći sve senzore pričvršćene na površinu kože, HAL detektira „bioelektrične signale (BES – engl. *Bioelectrical signals*)“ kako bi izveo željene pokrete pomoću dobrovoljnih naredbi korisnika. Računalo egzoskeleta kreira vlastite signale koji se šalju pogonskim jedinicama kako bi egzoskelet izvršio jednake kretnje kakve je korisnik naumio. HAL ima dvije vrste upravljačkih sustava koji se mogu koristiti zajedno u skladu s uvjetima korisnika. „Sustav dobrovoljne kontrole *Cybernetics*“ koristi BES za izvođenje željenih pokreta korisnika. Drugi je „*Cybernetics Autonomous Control System*“, sistem za ostvarivanje ljudskih pokreta generirajući okretni moment čak i ako se BES ne može otkriti. Ove dvije metode upravljanja razlog su zašto je HAL tako napredna tehnologija. Koristi se u bolnicama i klinikama za rehabilitaciju [6]. Najvažnije je postići dobivanje povratne informacije od mišića o izvršenim kretnjama kako bi mozak učio o aktivaciji mišića određenog dijela tijela. Uređaj se može u bilo kojem trenutku isključiti i uključiti. Dosadašnje izvedbe HAL egzoskeleta mogu koristiti ljudi do 80 kg [2]. Slika 7 prikazuje egzoskelet HAL.

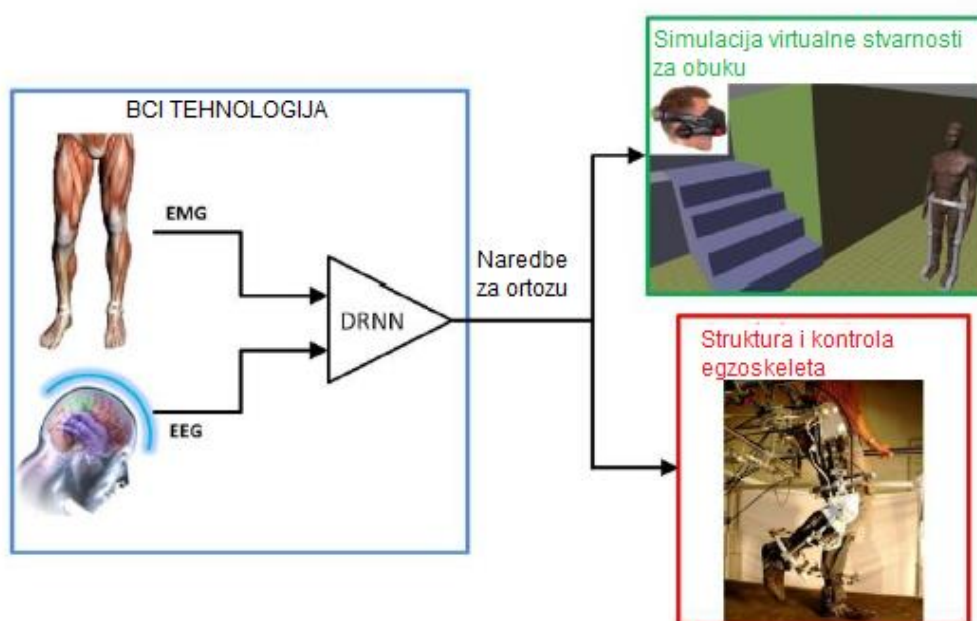


Slika 7. Egzoskelet HAL [2]

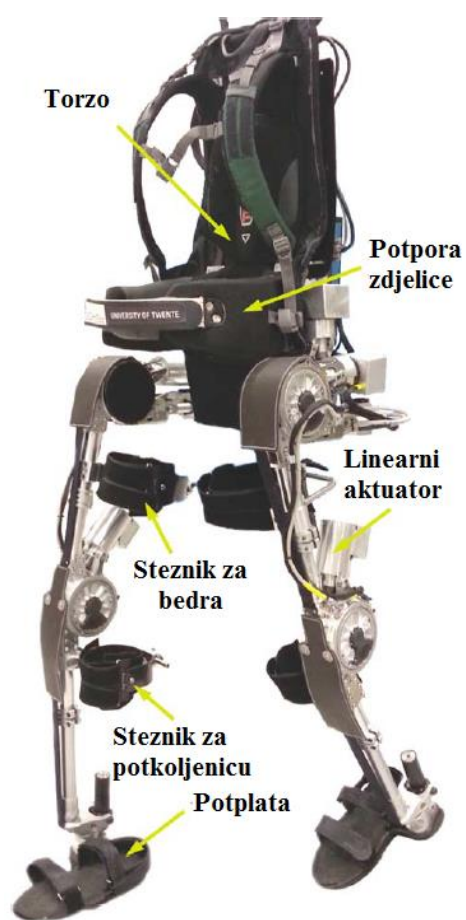
2.7. Mindwalker

Mindwalker je trogodišnji projekt u kojem su istraživači predstavili novu verziju egzoskeleta za pacijente s ozljedom leđne moždine, ali s netaknutim moždanim sposobnostima. Ovaj egzoskelet koristi se za kontrolu donjih udova oslanjajući se na BCI tehnologiju. Uz neinvazivni pristup, ovaj uređaj koristi elektroencefalografiju za prijenos informacija od mozga i očitavanje električnih signala u svrhu kretanja egzoskeleta. Ovakav način pokretanja koristi se sve više u medicinske svrhe kako bi se pacijentima ojačali mišići [7]. Bedreni i potkoljениčni segment ima teleskopsku podesivost kako bi egzoskelet koristila veća skupina ljudi visine h od 153 cm do 188 cm. Postoje i „klizne tračnice“ u zdjeličnom pojasu tako da se egzoskelet može prilagoditi širini kukova do 44 cm. Algoritam prilagodbe širine i dužine koraka omogućuje kontrolu nad težištem tijela. Zahvaljujući ovom algoritmu, egzoskelet se može suprotstaviti smetnjama okoline, poput guranja. Na temelju poznavanja anatomije čovjeka i raspona pokreta zglobova omogućeno je sjedenje, stajanje i hodanje. Skočni zglob opremljen je opružnim parovima antagonista. Serijska opruga je torzijska opruga posebno razvijena za postizanje ciljane krutosti uz minimiziranje težine pacijenta. Potplate na cipelama izrađene su od ugljičnih vlakana i sadrže remene na čičak za pričvršćivanje ljudskih stopala [8]. Većina EEG kapa zahtjeva dugotrajnu pripremu zbog pozicioniranja elektroda na mokru površinu gdje se nanosi provodljiv gel. Kod *Mindwalker* egzoskeleta koriste se tzv. suhe elektrode gdje nije potreban gel te se može svakodnevno koristiti. Od suhe EEG kape očekuje se da će omogućiti prikupljanje neuronskih signala koji se dalje pretvaraju u električni signal. U tu svrhu oslanja se na prostorni i vremenski signal prije same pohrane u dinamički ponavljajuću neuronsku mrežu DRNN (engl. *Dynamic Recurrent Neural Network*). DRNN sadrži unaprijed obrađene EEG skupove podataka koji obuhvaćaju različite uzorke hodanja. Kao alternativa kod upravljanja egzoskeletom može se koristiti i EMG metoda (engl. *Electromyography*). No, elektromiografija neće uvijek biti uspješna tijekom rehabilitacije osoba s ozljedom leđne moždine. Okruženje virtualne stvarnosti pruža vizualne povratne informacije i eventualno vestibularne povratne informacije. 3 glavna cilja rada egzoskeleta vidljiva su na Slici 8. Slika 9. prikazuje model ovog egzoskeleta na kojem se nalaze električni aktuatori s kliznom izvedbom koji služe za zakretanje zglobova egzoskeleta. Kontroler osigurava ravnotežu tijekom hodanja oslanjajući se na proprioceptivne senzore. Koriste se precizni senzori na kutu zgloba, inercijske mjerne jedinice, senzori sile / momenta, senzori za otkrivanje prepreka itd. Dodatna razina kontrolera koristi ekteroceptivne senzore (laserski

daljinomjer, kamere za vrijeme hodanja) kako bi se dobio 3D model prednjeg okruženja. Ovaj model dopušta provjeru i prilagođavanje egzoskeleta u rizičnim situacijama (npr. prepreke, neravan teren itd.). Egzoskelet postiže dinamičku ravnotežu tijekom hodanja bez upotrebe štake, ali se pomagala koriste radi sigurnosti korisnika. Kinematička kontrola bazirana na EEG-u jedna je od najvećih uspješnica i javlja se veliki interes za primjenu u svemirskoj tehnologiji [7]. Pojašnjenje sučelja mozak - računalo pomoću EEG-a slijedi u sljedećem poglavlju.



Slika 8. 3 glavna cilja rada *Mindwalker* egzoskeleta [7]



Slika 9. *Mindwalker* [8]

3. SUČELJE MOZAK - RAČUNALO (BCI) NA EGZOSKELETU DONJIH UDOVA

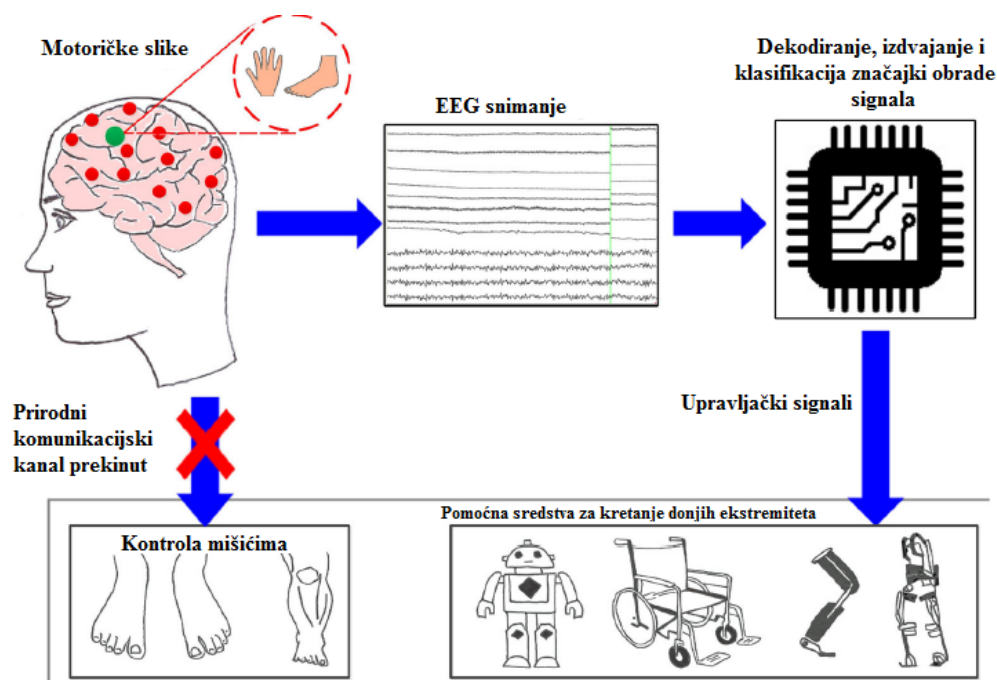
Često korišteni neinvazivni modalitet za snimanje moždanih signala je elektroencefalografija (EEG). EEG je široko primjenjivana, neinvazivna dijagnostička metoda kojom se registrira električna aktivnost neurona (živčanih stanica). Prikazuje ih se kao valovite linije (grafoelementi) na EEG snimci. Analizira se frekvencija valova u jednoj sekundi, njihov oblik i amplituda. Električna aktivnost predstavlja spontanu aktivnost mozga koja je uvijek prisutna. Snimanje aktivnosti neurona provodi se pomoću elektroda na koži koje su sastavni dio Comby kape. Elektrode su izrađene od Ag / AgCl pločica ili pozlaćenih pločica [9].

Egzoskelet prati namjeru kretanja korisnika putem dekodiranja signala elektroencefalografije (EEG). Sve više ljudi pati od motoričke smetnje ili smanjene pokretljivosti zbog nesreća, bolesti ili starenja. Da bi se riješio ovaj problem, egzoskelet roboti pridobili su pažnju pomažući ljudima koji pate od posljedica moždanog udara, invaliditeta pružajući pomoć pri hodanju. Neki od takvih egzoskeleta nabrojani su u prethodnom poglavlju. Posljednjih godina biološki signali, poput signala elektroencefalografije BCI metodom, postali su novo rješenje u rehabilitaciji osoba s invaliditetom. BCI je nemuskularni komunikacijski sustav u kojem se analizira EEG signal radi kontroliranja namjera korisnika vanjskim uređajem [10].

3.1. Vrste BCI sustava

Postoji nekoliko vrsta BCI tehnologije, ovisno o tome kako se dobiva EEG signal. Jedan od načina temelji se na principu stvaranja motoričke slike gdje osoba zamišlja pomicanje određenog dijela tijela. Istraživanja pokazuju da se signali mogu otkriti na lijevoj / desnoj strani kore mozga kada zamišljamo kretanje desnom / lijevom rukom. No, neki ljudi ne mogu proizvesti karakteristične EEG signale jer im se teško usredotočiti na motoričke slike prilikom kretanja. Druga vrsta BCI sustava temelji se na stabilnom stanju vizualno evociranih potencijala (SSVEP – engl. *Steady-state visual evoked potentials*). Kad se osoba usredotoči na vizualni podražaj na određenoj frekvenciji, kora mozga reagira s EEG-om veće amplitude na predviđenoj frekvenciji. U BCI sustavu svaka naredba odgovara ponavljajućoj vizualnoj stimulaciji na određenoj frekvenciji. Naredba se može dekodirati na temelju frekvencije EEG signala. SSVEP ima visoku brzinu prijenosa u kratkom vremenu treniranja što je njegova

velika prednost. Uz to, efektivna učestalost vizualne stimulacije obuhvaća frekvenciju f od 1 - 100 Hz, što znači da se puno naredbi može zadati u usporedbi s principom temeljenog na motoričkim slikama. Međutim, mora biti osiguran zaslon za prikaz vizualne stimulacije predmeta. Tako radi prethodno spomenuti egzoskelet REX [10]. Slika 10. prikazuje koncept rada BCI sustava.



Slika 10. Koncept rada BCI sustava [1]

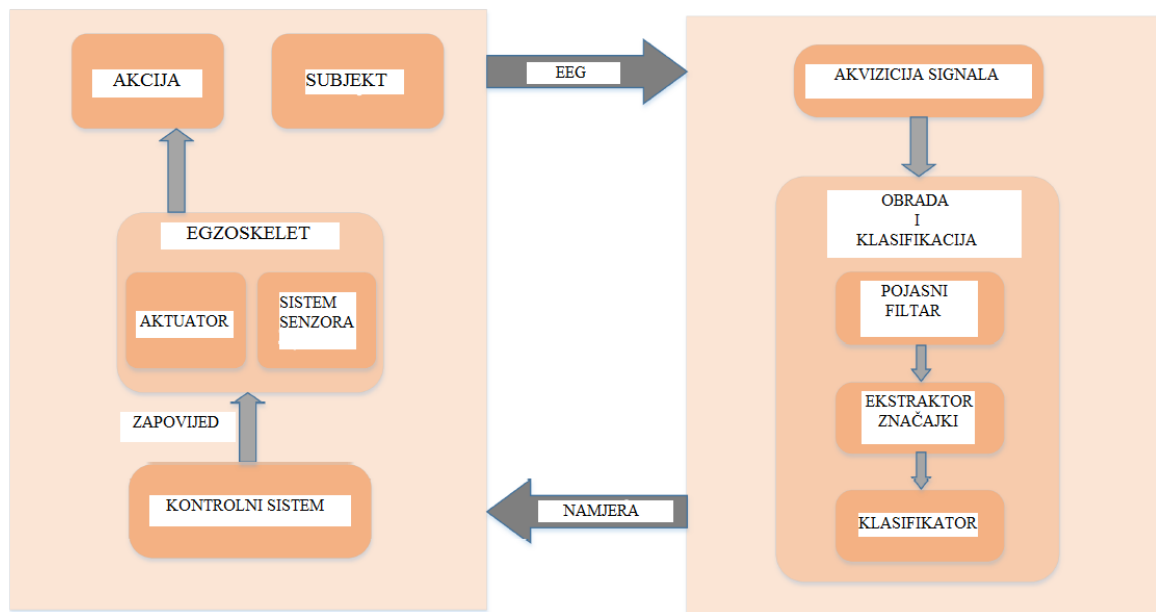
Slika 10. prikazuje shematski opis BCI sustava temeljenog na principu stvaranja motoričkih slika. Motoričke slike kodiraju se u obliku EEG snimki koje se dalje dešifriraju, obrađuju i provode u naredbe radi upravljanja egzoskeletom. Korisnikova voljna kontrola omogućuje dobrovoljno upravljanje uređajem (položaj zgloba, brzina, zakretni moment). Izvršni sloj šalje kontrolne naredbe na aktuator uređaja, a vizualne povratne informacije šalje korisniku putem zajedničke upravljačke jedinice radi smanjivanja mogućih pogrešaka. Kontrola povratnih informacija igra važnu ulogu u postizanju željenog ishoda. Ovo zatvara cjelokupnu upravljačku petlju i robotski uređaj počinje s izvršavanjem potrebnih zadataka [1].

3.2. Komunikacijski protokol

Poput osnovnog komunikacijskog sustava, BCI sustav ima ulaz, izlaz, komponente pretvaranje ulaza u izlaz i protokol odgovoran za početak, pomak i vrijeme rada u stvarnom vremenu. Dobiveni EEG signali prenose se na BCI operatora putem komunikacijskog protokola. Slično izlazu senzora, robot je usmjeren na zajedničku upravljačku jedinicu putem komunikacijskog protokola. Ulazi u dijeljeni upravljački modul senzorna su očitavanja robotskog uređaja, a izlaz je BCI operator (klasificirani signal). Klasificirani signal se kombinira s preciznim parametrom robota, npr. brzinom za generiranje pogonskog učinka. Ključni aspekt zajedničke kontrole je dvosmjerna komunikacija između čovjeka i egzoskeleta. Podijeljena kontrola korisna je prvenstveno za navigacijske upute. Kako egzoskelet ima samo tri moguće mentalne komande upravljanja poput naprijed, lijevo i desno, potrebna je pomoć uređaja za fino manevriranje. Drugo, kognitivne naredbe ne mogu uvijek biti savršene, tj. mogle bi biti nejasne [1].

3.3. Komponente sustava

Sučelje mozak – računalo sastoji se od sustava upravljanja egzoskeletima donjih udova koji se temelji na sljedećim komponentama: modul za prikupljanje signala, modul za obradu i klasifikaciju signala, kontrolni sustav i platforma egzoskeleta donjih udova. Slika 11. prikazuje da će modul za prikupljanje signala sakupljati EEG signal tijekom razdoblja prikazivanja vizualne stimulacije ili snimanja pokreta subjekta. Podaci EEG-a šalju se modulu za obradu i klasifikaciju, gdje će biti unaprijed obrađeni, a algoritam za izdvajanje značajki odmah je usvojen. Klasifikator prepoznaje namjeru kretanja. Nakon zamišljanja kretanja, kontrolni sustav šalje odgovarajuću naredbu egzoskeletu i izvršava se kretanje cilja. Za bilježenje EEG podataka koristi se „Biosemi ActiveTwo“ sustav s 32 elektrode koje su prikazane na Slici 12. [10].



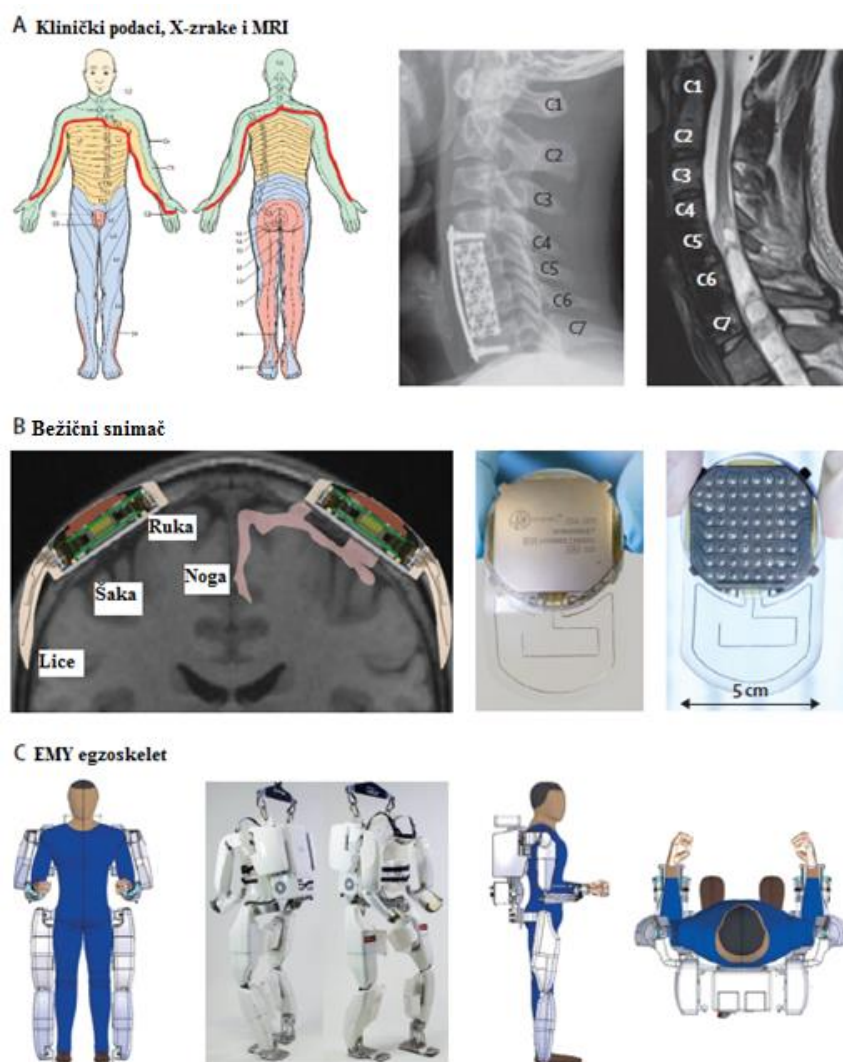
Slika 11. Komponente sistema [10]



Slika 12. „Biosemi ActiveTwo“ sistem [10]

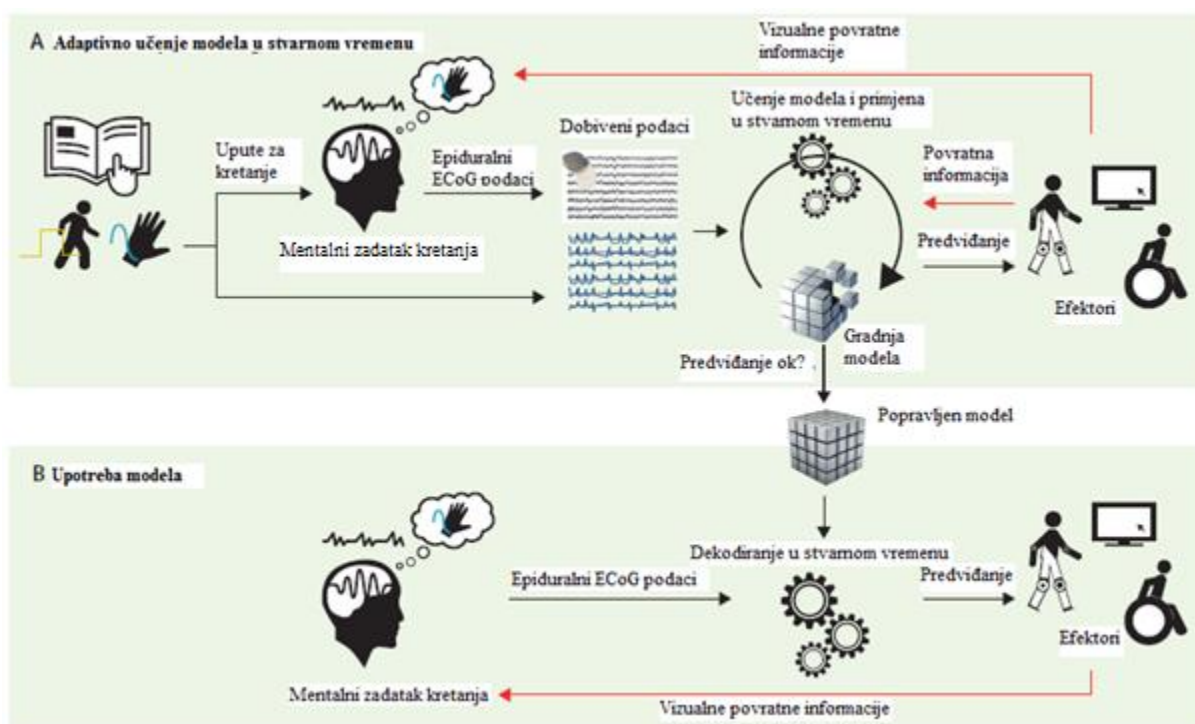
3.4. Bežična veza između BCI sustava i egzoskeleta

Ovakav sustav primijenjen je u jednom istraživanju na bolesnicima s tetraplegijom. Sustav sučelja mozak - računalo obuhvaća potpuno implantabilni epiduralni snimač sa 64 elektrode, motorizirani egzoskelet s četiri uda, ugrađene algoritme za dekodiranje signala i softver. Za potrebe istraživanja operirana su dva pacijenta radi ugradnje implantata. Pacijenti su se dobrovoljno prijavili u istraživanje putem interneta. Jedan od pacijenata imao je tetraplegiju nakon ozljede leđne moždine C4 - C5 (Slika 13.A). MRI (engl. *Magnetic resonance imaging*) pokazao je tešku leziju leđne moždine. Vratna kralježnica stabilizirana je pomoću kaveza. Elektroničke komponente stavljene su u titanovo kućište. Niz od 64 platinumiridijevih elektroda za snimanje postavljen je na ravnu unutarnju stranu uređaja (Slika 13.B). Podaci su emitirani putem antena ultra velikih radiofrekvencija (402 - 405 MHz). Antene su ugrađene u silikonski preklop ispod temporalnog mišića. Bežična veza koristila je dvije vanjske antene koje su postavljene ispred snimača. Na Slici 13.C priložena je robotska neuroproteza zvana egzoskelet *MobilitY* s 4 uda koji su potpuno motorizirani i sastoje se od 14 aktivnih stupnjeva slobode gibanja. Računalno sučelje u ruksaku prima epiduralne ECoG (engl. *Epidural electrocorticographic*) signale. Ti su signali dekodirani u stvarnom vremenu i pretvarani u translaciju ili rotaciju određenih dijelova egzoskeleta. Egzoskelet je samonosivi i ima autonomni način rada. Tijekom korištenja egzoskeleta, pacijent ima stalni pristup svim motoričkim dijelovima te ih može kontrolirati u bilo kojem trenutku. Prilagodljivi dekodirer omogućuje brzu kalibraciju i postizanje velike brzine kod dekodiranja informacija. Ako dekodirer procijeni malu učinkovitost pacijentove namjere, deaktiviraju se određeni stupnjevi slobode [11].



Slika 13. A. Klinički podaci, B. Bežični snimač i C. Egzoskelet EMY [11]

Za vrijeme adaptivnog učenja (Slika 14.) u stvarnom vremenu, pacijent je zamoljen da mentalno pokrene egzoskelet zamišljanjem određenog pokreta. Na taj način generira neuronsku aktivnost u svojim senzomotornim korteksima (moždana kora). Softver analizira podatke poslane od dekodera i generira naredbe za pokretanje motora egzoskeleta. Ovaj postupak pružio je pacijentu vizualne povratne informacije (crvena strelica), a za vrijeme kalibracije date su povratne informacije dekodera (crvena strelica). Ovaj je model iterativno ažuriran svakih 10 - 15 sekundi dok je pacijent izvršavao zadatke treninga. Tumačeni su željeni pokreti i generirane neke naredbe efektorima koji bi mogli pomicati udove u skladu s naredbama. Dobivena radnja pružila je vizualnu povratnu informaciju pacijentu dopuštajući mu da pri izvršavanju sljedećeg stavka prilagodi svoj mentalni zadatak [11].



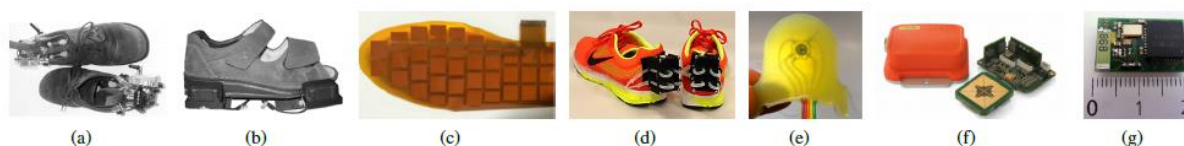
Slika 14. Strategija adaptivnog učenja u stvarnom vremenu [11]

Prilikom praćenja nisu zabilježeni nikakvi štetni učinci. Dekoder je redovito kalibriran i ažuriran. U ovom je istraživanju prvi put uspješno primijenjen bežični epiduralni snimač te bilateralne elektrode koje su omogućile kontrolu nad sva 4 uda. Ovo proširenje omogućit će pacijentima samostalno upravljanje svojim vozilima i invalidskim kolicima. Istraživanje je pokazalo kako bi senzomotorni korteksi mogli biti ključ u postizanju stvarnih ili virtualnih kretnji kod pacijenata s tetraplegijom [11].

3.5. Nosivi senzori

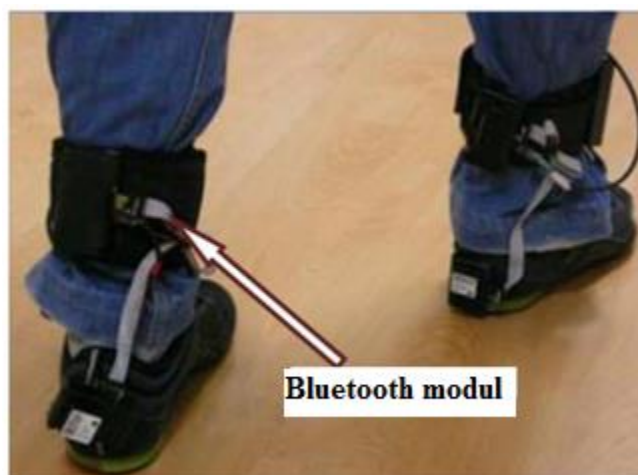
Kinematika hoda proučava ljudsko kretanje koje se može mjeriti inercijalnim sensorima, kao i snimanjem pokreta sustava. To se odnosi na proučavanje sila i zakretnih momenata, čiji je rezultat dinamički pokret u ljudskom hodu. Otpornici osjetljivi na silu vrlo su popularni zbog njihove niske cijene i jednostavnosti uporabe. Primjerice, razvijeni je integrirani bežični senzorski sustav temeljen na otpornicima osjetljivim na silu radi pružanja kvantitativne analize hoda (Slika 15.a) [12]. Takav sustav naziva se *GaitShoe*. Uređaj ima sposobnost detekcije udarca petom, procjene orijentacije i položaja stopala i prstiju. Sustav sadrži tri ortogonalna akcelerometra, tri ortogonalna žiroskopa, četiri senzora sile, dva dvosmjerna

senzora savijanja, dva senzora dinamičkog tlaka i senzore visine električnog polja [13]. Sile podloge često se očitavaju u kliničkim istraživanjima radi osiguravanja visoke točnosti mjerenja GCF (engl. *Ground contact forces*). Za prikupljanje sila podloge izvan laboratorija koristi se cipela kakva je prikazana na Slici 15.b. Mogu se koristiti senzori na cipelama baziranim na vlaknima radi poboljšanja udobnosti korisnika kao što prikazuje Slika 15.c., no, njegova mjerna točnost nije izrazito visoka. Sustav pametnih cipela može sadržavati silikonsku cijev namotanu na dnu uložka koja se spaja na barometrijski senzor za procjenu sile podloge mjerenjem tlaka zraka (Slika 15.d). Isto tako, mogu se koristiti senzori bazirani na ugrađenim mikrofluidnim kanalima razvijeni za mjerenje normalnih i posmičnih sila tijekom kretanja egzoskeleta po podlozi (Slika 15.e). Mjerne ćelije također su korištene za mjerenje sila podloge. Procjena zakretnog momenta može se postići inverznom kinematikom na temelju podataka o mjerenju sile i parametara segmenta ljudskog tijela. Postoji i nekoliko komercijalnih senzora za analizu kretanja kao što je Xsens na Slici 15.f koji se može koristiti za aplikacije u stvarnom vremenu u analizi hoda. Slika 15.g prikazuje razvijen mikro senzor za analizu hoda [12].



Slika 15. Primjeri nosivih senzorskih sustava za analizu hoda: a) Otpornici osjetljivi na silu; b) Ploča sile; c) Senzori bazirani na vlaknima; d) Senzor sile temeljen na tlaku; e) Senzor meke sile; f) Xsens jedinica; g) Mikro senzor [12]

2009. godine Benocci i suradnici sa Sveučilišta u Bologni razvili su bežični sustav za analizu hoda i držanja. Nosivi sustav koristio je 24 hidroćelije za mjerenje plantarnog tlaka i inercijsku mjernu jedinicu (IMU - engl. *Inertial Measurement Unit*) u svakom uložku cipele. IMU ima mogućnost integracije troosnog akcelerometra i digitalnog troosnog žiroskopa. Za upravljanje sustavom implementiran je mikrokontroler Texas Instrument MPS430, a Bluetooth uređaj služi kao primopredajnik. Prikupljeni podaci sa senzora omogućili su korisniku prepoznavanje faza hodanja kao što su zamah i stajanje [13]. Ovaj sustav prikazan je na Slici 16.

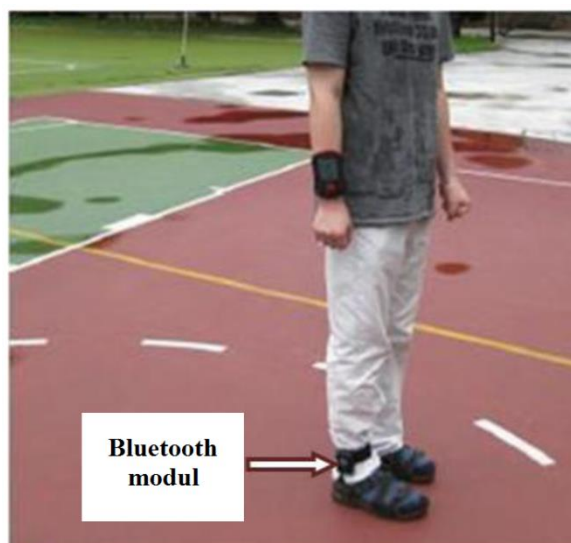


Slika 16. Bluetooth modul [13]

Shu i suradnici razvili su sustav za mjerenje i analizu plantarnog tlaka u cipeli koji se temelji na nizu senzora tlaka u ulošku. Uložak je mekan, lagan i visoke osjetljivosti na pritisak. Senzori su povezani mekom polimernom pločom pomoću vodljivih niti i pričvršćeni na šest mjesta na ulošku, kao što je prikazano na Slici 17. Mikrokontroler PIC18F452 i Bluetooth modul pričvršćeni su na gležanj pacijenta. Sustav se može povezivati s računalom ili pametnim telefonom i ima mogućnost izračunavanja srednjeg tlaka, vršnog tlaka i centra pritiska. Rezultati su prikazani za statičke i dinamičke uvjete mjerenja [13]. Slika 18. prikazuje sustav mjerenja i analize plantarnog tlaka u cipeli koji se temelji na nizu senzora tlaka u tkanini.



Slika 17. 6 senzora tlaka u ulošku [13]



Slika 18. Sustav mjerenja i analize plantarnog tlaka u cipeli [13]

Cilj je ostvariti bežični senzorski sustav za mjerenje plantarnog tlaka koji je kompaktan i lagan za nošenje. Daljnjim istraživanjima nastoji se minimizirati masa i pojednostaviti način korištenja te iz tih razloga razvoj takvog sustava predstavlja izazov za mnoge istraživače [13].

3.6. SIAT egzoskelet donjih udova

Sustav radi neovisno o fizičkim ili mišićnim intervencijama, koristeći moždane signale koji odražavaju namjeru korisnika za kontrolom donjih udova. Prva generacija SIAT (engl. *The Shenzhen Institutes of Advanced Technology*) egzoskeleta, Slika 19., zasnovana je na bionici čovjeka 2012. godine. Najnovija generacija ima optimiziraniju strukturu s manjom težinom, što je ugodnije za nositelje. Dizajniran je radi pomoći kod rehabilitacijskog treninga ili kao pomoć u hodaњу. Egzoskelet je uspješno pomogao ljudima u hodaњу, sjedenju, ustajanju i ostalim svakodnevnim aktivnostima. Sastoji se od mehaničkog tijela, sustava upravljanja, sustava pokretanja i senzora [10]. Senzori ugrađeni na mehaničko tijelo prikazani su na Slici 20.



Slika 19. Egzoskelet SIAT. A: ruksak s kontrolerom i baterijom; B: dio struka; C: dekoderi; D: podesivi segment; E: pregrada koljenog zgloba; F: podesivi segment potkoljenice; G: zglob gležnja; H: nosive cipele; I: DC motor; J: zglob kuka; K: stražnja pregrada; L: zglob koljena [10]



Slika 20. Senzori egzoskeleta [10]

Mehaničko tijelo sastoji se od zglobova, karika i ruksaka s hardverom i baterijom. Trenutno, egzoskelet SIAT ima ukupno 10 stupnjeva slobode (SS), uključujući tri zgloba na svakoj nozi. Sva tri zgloba dopuštaju fleksiju / ekstenziju (F / E). U zglobovima koljena i kuka postoje gibanja u smjeru F / E zahvaljujući istosmjernim motorima, dok su kod bočnih pokreta SS zgloba kuka i gležnja pasivni. Egzoskelet omogućuje hodanje u sagitalnoj ravnini zglobova kuka i koljena, dok zglob gležnja pomaže koristeći pasivne opruge za smanjenje vibracija.

Osim toga, duljine bedara i potkoljenica podešavaju se po visini, što omogućuje prilagođavanje prema visini nositelja egzoskeleta. Četiri istosmjerna motora implementirana su kod izvršavanja opisanih pokreta u sustavu pokretanja. Otpornici za detekciju sile (FSR - engl. *Force sensing resistor*) nalaze se u ulošku koji je postavljen na cipelama za mjerenje tlaka između tla i stopala. Opremljen ovim sensorima egzoskelet može procijeniti faze držanja i hoda tijekom hodanja. Sustav upravljanja može odabrati različite strategije upravljanja s obzirom na stanje egzoskeleta. Sustav upravljanja prima namjeru kretanja predmeta kroz BCI. Međutim, prije izvršavanja postupka egzoskelet mora provjeriti trenutno stanje pomoću senzorskog sustava kako bi se izbjeglo izvođenje opasnih pokreta kao što je prelazak sa sjedenja na hodanje, što se može dogoditi zbog pogrešne klasifikacije rezultata namjere kretanja. Pomoću SIAT egzoskeleta proveden je internetski eksperiment gdje EEG signal dešifrira BCI sustav. Za vrijeme provođenja eksperimenta, subjekt slijedi savjete prikazane na zaslonu radi dovršavanja pokusa. U drugom dijelu eksperimenta subjekt nosi kapu s elektrodama. Za svaki trag pokusa nositelj mora izvršiti 4 unaprijed postavljena pokreta: sjedenje do uspravljanja, hodanje dva puta i od ustajanja do sjedenja, kao što je prikazano na Slici 21. Svaka proba se ponavlja 10 puta. Budući da eksperiment nije prošao bez pogrešaka, pogrešni rezultati klasifikacije čine se nezaobilaznima u praksi. Svaki će ispitanik pokušati koristiti BCI za kontrolu egzoskeleta radi izvršavanja dodijeljene radnje prema spomenutom redoslijedu iznad. Ako BCI dobije netočan rezultat klasifikacije, egzoskelet ne bi dovršio nijednu radnju. Ako iz sustava izađu bilo kakvi netočni rezultati, ispitanik bi pokušavao ispočetka dok ne bi dobio pravo prepoznavanje. Tablica 1. prikazuje kontrolne strategije tijekom internetskog eksperimenta [10].



Slika 21. Scene internetskog eksperimenta [10]

Tablica 1. Kontrolne strategije [10]

| | SJEDNI! | USTANI! | HODAJ! |
|----------------|----------------|----------------|---------------|
| SJEDNI! | Zadržati | Izvršiti | - |
| USTANI! | Izvršiti | Zadržati | Izvršiti |
| HODAJ! | - | Izvršiti | Zadržati |

Za ispitivanje funkcije perifernog živčanog sustava može se koristiti i metoda EMG. Motorni neuroni prenose električne impulse koji uzrokuju mišićnu kontrakciju. Kao i kod EEG metode, aktivnosti neurona prikazuju se u obliku valovitih linija na monitoru. Kontrola i pokretanje egzoskeleta može se izvršiti i pomoću elektromiografije koja može poslužiti kao ulaz upravljačkog signala [7].

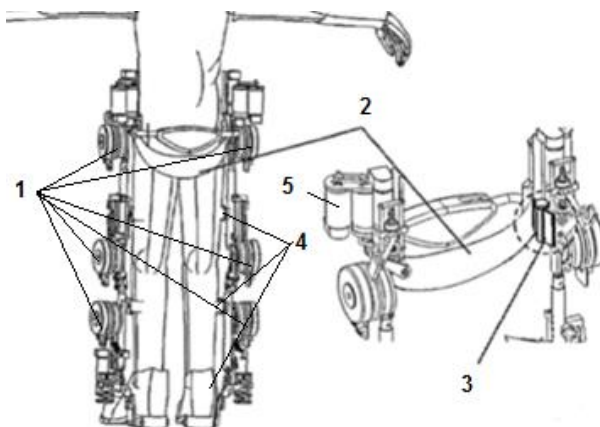
4. PRETRAŽIVANJE PATENATA

Patenti pomažu pri razvoju proizvoda tako da potiču ideje i ukazuju na moguća poboljšanja samih proizvoda. U nastavku su prikazani neki patenti umjetnog egzoskeleta donjih ekstremiteta.

4.1. PATENT 1: EP3225363B1

Izum se odnosi na egzoskelet za pomoć pri kretanju, koji se može postaviti korisniku sprijeda prema unatrag u anteroposteriornom smjeru u sagitalnoj ravnini, bez potrebe za funkcionalnim prijenosom korisnika na egzoskelet. Ovaj egzoskelet sastoji se od mehaničke strukture koja sadrži segmente spojene motoriziranim zglobovima (1), sustav za pričvršćivanje (2) i sustav korisničkog sučelja. Sadrži 7 aktiviranih i kontroliranih stupnjeva slobode po udu, osiguravajući korisniku održavanje ravnoteže tijekom kretanja bez korištenja potpornih pomagala. U 7 stupnjeva slobode spadaju: fleksija / ekstenzija kuka, abdukcija / addukcija kuka, rotacija kuka, fleksija / ekstenzija koljena, rotacija koljena, fleksija / ekstenzija gležnja i everzija / inverzija gležnja. U proučavanju kretanja pojavljuje se dodatni stupanj slobode: rotacija koljena po završetku faze potpore. Sustav za pričvršćivanje ovog egzoskeleta sadrži krutu lumbalnu armaturu spojenu na zglobove preko rotacijske osovine i ishijatski oslonac (3) koji se zateže ručnim ili automatskim mehanizmom. Proteze su spojene pomoću traka s čičkom ili kopčama na udove korisnika (4). Mehanička struktura izrađuje se po mjeri kako bi odgovarala pacijentu. Jedan od glavnih tehnoloških izazova je pronalaženje kompromisa između lagane i kompaktne strukture, koja olakšava rukovanje korisniku koji pati od miopatije, i robotskog sustava koji implementira kompletan biomehanički model. Inverzija i everzija gležnja aktivira se pomoću aktuatora (5). Hodom se upravlja na temelju unaprijed snimljenih uzoraka, a faze kretanja razlikuju se pomoću senzora ispod stopala koji određuju silu podloge. Struktura ovog uređaja uključuje zaštitu od vode i prašine. Njegov osjetni sustav uključuje inercijske jedinice, inkrementalne optičke mjerače za položaj zglobova i senzore pritiska u tabanima. Egzoskelet sadrži sustav korisničkog sučelja koji tumači namjeru kretanja korisnika i prenosi te informacije u sustav kontrole kretanja. Ovaj sustav korisničkog sučelja može se sastojati od: upravljačke palice, tableta, mobilnog telefona, ekrana osjetljivog na dodir, tipkovnice, miša, mikrofona, kamere, čitača pokreta očiju, senzora za elektromiografiju, sučelja mozak - računalo (BCI), sučelja za

elektrookulografiju (EOG – engl. *Electrooculography*), senzore sile ili zakretnog momenta, inercijske mjerne jedinice (IMU), senzore položaja, brzine ili nagiba itd. [14]. Patent 1 s označenim dijelovima prikazan je na Slici 22.



Slika 22. Patent 1 [14]

4.2. PATENT 2: CN104797385B

Ovaj tip egzoskeleta koristi se u medicinske i vojne svrhe. Kod liječenja pacijenta, terapeut može koristiti kontrolni sustav za upravljanje tim egzoskeletom kako bi pacijent mogao hodati. Egzoskelet aktivira mišiće tijela te ih priprema za pokret. No, on nema sposobnost jačanja ili obnavljanja mišićnog tkiva. U svrhu napretka ovog izuma, koristi se električna stimulacija mišića (EMS - engl. *Electrical Muscle Stimulation*) pomoću koje se uzrokuje kontrakcija mišića. Svi senzori ili dio senzora konfigurirani su tako da detektiraju neuronski signal koji stvara korisnik. Senzor ne mora biti postavljen tako da se nalazi u lokalnoj regiji tijela koja ga zanima. Korisnik može patiti od jednog ili više neuronskih oštećenja, tj. od npr. oštećenja leđne moždine, brahijalnog pleksusa i slično. Tada nije moguće slanje neuronskog signala iz tog lokalnog područja pa se postavlja „Under“ na okolno zahvaćeno područje. Sučelje aktivacije mišića može sadržavati jednu ili više elektroda i to u obliku ugrađene elektrode, implantirane elektrode ili elektrode postavljene na kožu korisnika. Primljeni signal podataka i signal za pokretanje šalje se u bilo koju komponentu kontrolera. Ulazno izlazne komponente mogu biti antena, receptor ili primopredajnik. Slanje i primanje signala može se provoditi i preko bežične komunikacije (na primjer Bluetooth, NFC tehnologija, aplikacije i slično) [15].

4.3. PATENT 3: CN103932870B

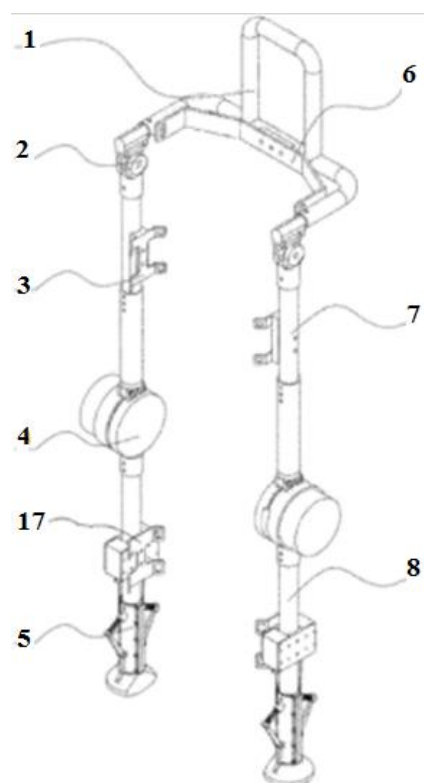
Izum otkriva nosivi egzoskelet donjih udova koji sadrži okvir za podupiranje struka, nosač predmeta u struku, podesivi mehanizam kuka, koljena i gležnja, cipele za otkrivanje pritiska, graničnike i razne spojnice. Egzoskelet ima 12 stupnjeva slobode gibanja (SS), svaki kuk ima dva SS, koljeno po jedan SS i gležanj ima tri stupnja slobode gibanja. Zglobovi koljena imaju malu koaksijalnost i odstupanje položaja. Ovaj egzoskelet koriste rehabilitacijske ustanove kao pomoć nepokretnim ljudima. Osim toga, može se nositi i sinkronizirati s pokretima čovjeka te prikuplja pokretne informacije o ljudskom tijelu. Mehanički dio uređaja sadrži okvir za lumbalni oslonac i nosač prtljage, podesive mehanizme zgloba koljena, kuka i gležnja, remen na cipelama i priključke. Ovaj egzoskelet napravljen je i kao vozilo radi pomoći korisniku koji nosi teški teret pri hodanju [16].

4.4. PATENT 4: CN109044742B

Izum se odnosi na egzoskelet donjih udova za rehabilitacijske potrebe. Nosiv je izvan tijela korisnika te se pokreće pomoću motora, hidraulične i zračne pumpe. Pomaže nepokretnim osobama kod hodanja, penjanja i silaženja po stepenicama. Moduli pokretanja zgloba kuka i koljena koriste se radi ostvarivanja aktivnog stupnja slobode istežanja i savijanja u sagitalnoj ravnini. Modul za podešavanje bedara uključuje gornji dio spojnog dijela, podupirač u smjeru prema dolje te dio za pričvršćivanje na nogu opremljen remenom od tkanine. Podešava se po duljini. Modul zgloba koljena sastoji se od motora, kugličnog vijka koljena, spojne šipke i nastavka koljenog zgloba prema dolje. Modul za podešavanje potkoljenice sastoji se od potporne šipke koja služi za produljenje tog dijela, prednje pregrade i remena od tkanine za pričvršćivanje egzoskeleta na pacijenta. Modul pasivnog pokretanja gležnja sastoji se od pritisne opruge zgloba gležnja i potpornog okvira. Opruga služi za skladištenje energije u obliku plantarfleksije. Uređaj s pločicom postavljen je u okvir zgloba gležnja i zabrtvljen radi potpore tog dijela. Cipele sadrže senzore postavljene na donji dio same cipele. Senzori testiraju tlak prilikom hodanja na vrhu prstiju i na peti cipele. Modul stražnjeg okvira sadrži stražnju ploču, potpornu konstrukciju za struk, remene, upravljač i upravljački program, litijevu bateriju i ploču za podešavanje širine struka. Ovaj uređaj zahtijeva i korištenje pomoćnih štaka, stoga osoba treba biti pokretna u gornjem dijelu tijela [17].

4.5. PATENT 5: US11071675B2

Ovaj izum pripada tehničkom području mehatronike i biomedicinskog inženjeringa i predstavlja egzoskelet za donje ekstremitete koji pomaže čovjeku s invaliditetom kod hodanja čime mu se jačaju mišići. Ako je osoba paralizirana, tada ovaj egzoskelet pomaže osobi postaviti se na noge. Ovaj egzoskelet ima funkciju amortiziranja i veliku nosivost, čime pomaže korisniku da brže trči. Sustav egzoskeleta pruža funkciju amortiziranja kao otpor sili podloge prema uputama aplikacije kada korisnik skače prema dolje. Sustav s funkcijom ublažavanja skoka sastoji se od okvira za leđa (1), dva mehanizma za kretanje zgloba kuka (2), dvije teleskopske šipke kod bedara (7), dva mehanizma za kretanje zglobova koljena (4), dvije šipke kod potkoljenice (8), dva mehanizma za amortiziranje stopala (5), okvir za vezivanje oko struka (6) i dva okvira za vezanje za noge korisnika (3, 17). Okviri za spajanje bedara povezani su fleksibilnim zupčanicima, reduktorom i motorom. Upravljački moduli povezani su elektromagnetima. Svaki od upravljačkih modula sadrži gornje računalo, bežični komunikacijski modul i upravljačku ploču. Elektromagneti postavljeni su na okvire za učvršćivanje elektromagneta, a okviri za učvršćivanje spojeni su na šipke pomoću vijaka. Prilikom kretanja po ravnom tlu, motori za kretanje zgloba koljena izbacuju zakretni moment, a reduktori mehanizma kretanja zgloba koljena pretvaraju rotaciju vanjskih osovina motora u pokrete savijanja i rastezanja. Prilikom skoka gumeni potplati su u dodiru s tlom i pokreću se mehanizmi za amortiziranje stopala sastavljeni od opruga. Kada se amortizirajuće opruge komprimiraju u procesu slijetanja, jedan dio potencijalne energije pretvara se u unutarnju energiju amortizirajućih opruga [18]. Slika 23. prikazuje patent 5.



Slika 23. Patent 5 [18]

5. KONSTRUKCIJSKA RAZRADA

5.1. Tehnički upitnik

Tehnički upitnik pomaže pri razumijevanju rizika koje je potrebno razmotriti prilikom planiranja proizvoda. Slijedi nakon što se istraži tržište i pronade mjesto za novi proizvod ili unaprjeđenje postojećeg proizvoda. U fazi koncipiranja provodi se analiza korisničkih potreba pomoću koje se određuju poželjne karakteristike uređaja. Postavljanjem pitanja pretpostavljaju se ograničenja u razvoju novog projekta. Odgovaranjem na tehnički upitnik dolazi se do definicije cilja. Tehnički upitnik prikazan je u Tablici 2., prema predlošku [19].

Tablica 2. Tehnički upitnik [19]

| |
|---|
| 1. Što je stvarni problem koji treba riješiti? |
| Osmisliti konstrukciju egzoskeleta s BCI sustavom koja će omogućiti jednostavnije kretanje osobe s invaliditetom, a da se pritom osjeća sigurno od ispadanja ili padanja. |
| 2. Koja je implicitna očekivanja i želje potrebno uključiti u razvoj? |
| Poboljšanje egzoskeleta radi sigurnosti i pouzdanosti kod kretanja osobe. Treba obratiti pažnju da zadovoljava ergonomske kriterije kako bi se osoba ugodno osjećala prilikom nošenja egzoskeleta. |
| 3. Jesu li pretpostavljene potrebe korisnika, funkcionalni zahtjevi i ograničenja zaista realni? |
| Pretpostavljene potrebe korisnika su realne, funkcionalni zahtjevi su u skladu s traženim, a ograničenja uvijek postoje i gotovo uvijek su jednaka kod svake izrade egzoskeleta. Ponekad je teško uskladiti i ostvariti tražene zahtjeve zbog ograničenja koja prethode razvoju, no cilj razvoja je napraviti takvu konstrukciju koja će što bolje zadovoljiti sve kriterije uz dostupne tehnološke mogućnosti. |
| 4. U kojim smjerovima postoje mogućnosti za kreativni razvoj i inventivno rješavanje problema? |
| Egzoskelet s BCI sustavom proizvod je budućnosti i postoje brojna poboljšanja koja se još nisu razradila, počevši od primanja signala u mozgu pa sve do pokretanja egzoskeleta. Kod pričvršćivanja egzoskeleta za tijelo postoje mogućnosti izmjene materijala, načina |

pričvrščivanja ili ergonomske izmjene. Bitno je skrenuti pogled s konvencionalnih rješenja i dati mašti na volju.

5. Ima li limita na kreativnost u razvoju?

Limit na kreativnost u razvoju ne postoji jer biomedicinski inženjering još nije doživio vrhunac i u tom području ne postoje limiti, već jedino napreci. Potrebno je izraziti kreativnost kako bi se potaknula nova rješenja, a time i novi načini rehabilitacije pacijenata.

6. Koje karakteristike / svojstva proizvod nužno mora imati?

Egzoskelet mora biti siguran (remeni, pojasevi), ispravan i jednostavan za korištenje i mora imati što manju masu kako se ne bi previše opteretilo korisnika. Treba biti podesiv po visini kako bi bio namijenjen za veću skupinu ljudi.

7. Koje karakteristike / svojstva proizvod sigurno ne smije imati?

Proizvod ne smije ni na koji način ugrožavati sigurnost i zdravlje korisnika. Njegova neispravnost, kompliciranost i prevelika masa posljedično bi ugrozile korištenje i rehabilitaciju.

8. Koji se aspekti razvoja mogu i trebaju kvantificirati u ovom trenutku?

Materijal, masa, pogonski dio, dimenzije i troškovi razvoja.

9. Jesu li razvojni zadaci postavljeni na prikladnoj razini apstrakcije?

Iako postoje neka ograničenja, razvojni zadaci su postavljeni na prikladnoj razini apstrakcije.

10. Koja su tehnička i tehnološka ograničenja naslijeđena iz prethodnog iskustva sa sličnim proizvodom?

Cijena razvoja, potreba za educiranim fizioterapeutima, masa egzoskeleta, ograničeno na pacijente s netaknutim moždanim sposobnostima, sustav pokretanja, sustav za prikupljanje signala, senzori.

5.2. Definicija cilja

Definiranje jasnih zahtjeva za konstrukcijsku razradu nužan je preduvjet za traženje novih rješenja, no jasni zahtjevi ipak ne garantiraju uspješan proces konstrukcijske razrade. Stvaranje novih rješenja zahtjeva vrijeme, novac i kreativnost. Kako bi se poticala kreativnost, potrebno je uključiti što više ljudi te surađivati s interdisciplinarnim timovima [19].

Tablica 3. Definicije cilja [18]

| | |
|--|--|
| Naziv projekta: | LJUDSKI EGZOSKELET DONJIH UDOVA SA SUČELJEM MOZAK - RAČUNALO |
| Opis proizvoda: | Uređaj namijenjen paraplegičarima kao pomoć pri kretanju. |
| Primarno tržište: | Osobe s povredom leđne moždine, osobe s mišićnom distrofijom |
| Sekundarno tržište: | Bolnice, rehabilitacijski centri, privatne ustanove |
| Karakteristike koje se podrazumijevaju: | Sigurnost, točnost, dugotrajnost, lakoća korištenja, pouzdanost |
| Ciljane grupe korisnika: | Odrasle osobe svih starosnih skupina |
| Pravci kreativnog razvoja: | Moguće je promijeniti dimenzije i oblik uređaja, mogućnost brzog pokretanja, mogućnost hodanja po stepenicama i mogućnost sjedenja, mogućnost hodanja po ledu, snijegu i kiši, kretanje pomoću vizualnih podražaja iz mozga, bežično povezivanje s računalom i mobitelom radi bilježenja rezultata napretka. |
| Limiti projekta: | Uređaj mora biti bezbolan i siguran. Uređaj je glomazan i ograničen na određenu skupinu ljudi. Troškovi razvoja su veliki. |

5.3. Definiranje zahtjeva

Iz tehničkog upitnika i definicije cilja te pretraživanja baze patenata i istraživanja tržišta, dobivena je lista funkcionalnih i konstrukcijskih zahtjeva koje egzoskelet donjih udova s BCI mora zadovoljiti. Funkcionalni zahtjevi uključuju sve bitne specifikacije i sposobnosti koje proizvod mora sadržavati. Konstrukcijski zahtjevi pomoći će u pravilnom razvoju proizvoda, načinu oblikovanja, izboru materijala ili odabiru već gotovih proizvoda.

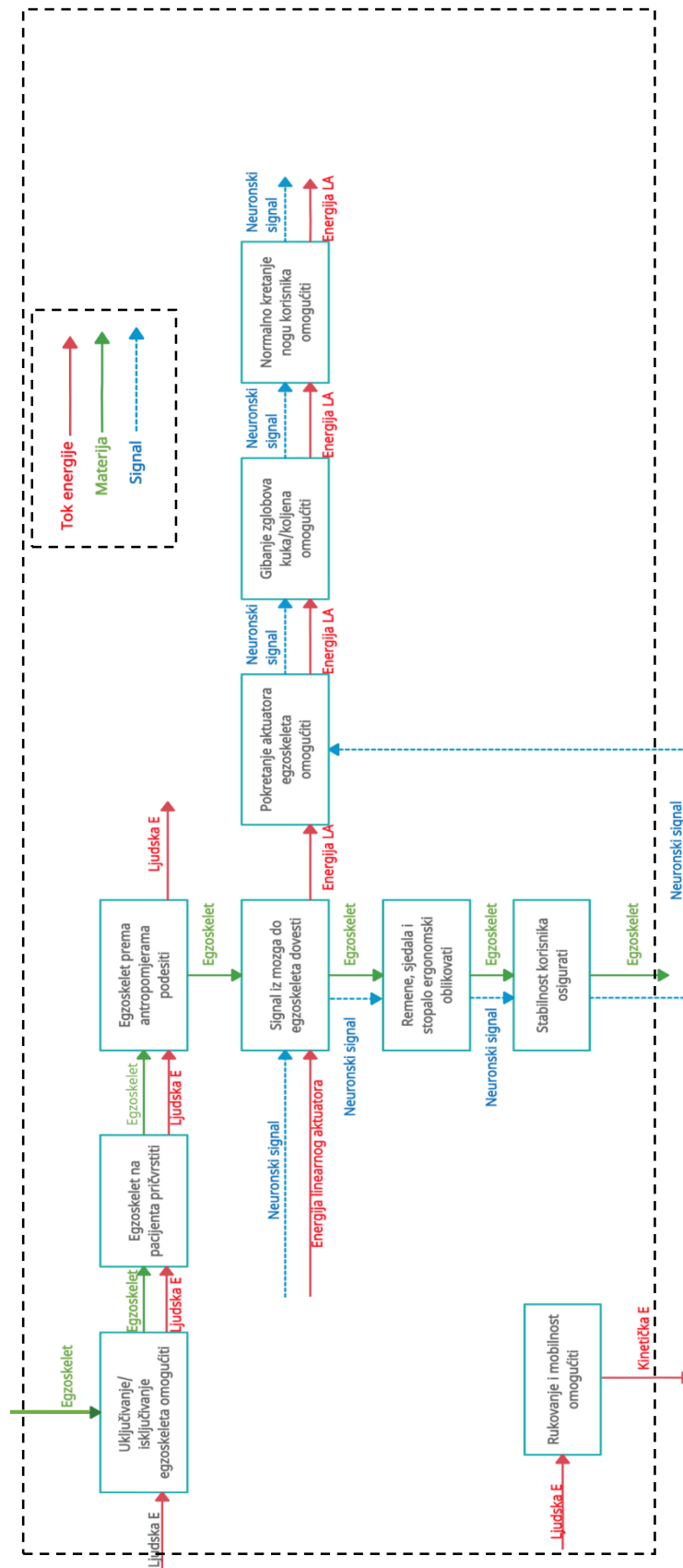
Tablica 4. Lista zahtjeva

| FUNKCIONALNI ZAHTJEVI | KONSTRUKCIJSKI ZAHTJEVI |
|---|---|
| Osigurati zdravlje korisnika tijekom korištenja proizvoda. | Sadržavati električne linearne aktuatora na zglobovima kuka i koljena radi pokretanja samog egzoskeleta. Zglob gležnja ostaviti pasivnim radi jednostavnosti upravljanja i manje mase uređaja. |
| Omogućiti jednostavno korištenje proizvoda. | Imati mogućnost podešavanja po visini kako bi ovaj proizvod mogla koristiti velika skupina ljudi. |
| Prepoznati neuronske signale radi pokretanja proizvoda. | Omogućiti prikupljanje neuronskih signala pomoću tzv. suhe elektrode na EEG kapi. |
| Sadržavati sučelje mozak - računalo (BCI). | Sadržavati kopče, remene i pojaseve oko nogu i struka radi pričvršćivanja proizvoda na tijelo korisnika. |
| Imitirati pokrete nogu u svrhu normalnog kretanja korisnika, a u to se ubraja: hodanje po ravnom tlu, hodanje po stepenicama, sjedenje. | Sadržavati baterije na punjenje radi lakšeg napajanja i servisiranja. |
| Omogućiti jednostavno i brzo montiranje proizvoda na tijelo korisnika. | Odabrati materijal otporan na koroziju, vodu i prašinu oko aktuatora, stopala i postolja, a remene i pojaseve načiniti od materijala male krutosti kako bi bio ugodan korisniku i imao sposobnost prilagođavanja. |
| Sadržavati dugotrajnost, izdržljivost i otpornost na trošenje. | Imati što manju masu kako bi bio lakši za korištenje i nošenje tijekom kretanja. |
| Omogućiti podešavanje tzv. sjedalice, remena oko zdjelice, bedara i potkoljenice te remena na cipelama kako bi proizvod mogla koristiti veća skupina ljudi. | Sadržavati senzore nagiba radi praćenja naginjanja tijela i proprioceptivne senzore radi osiguravanja ravnoteže prilikom kretanja egzoskeleta. |

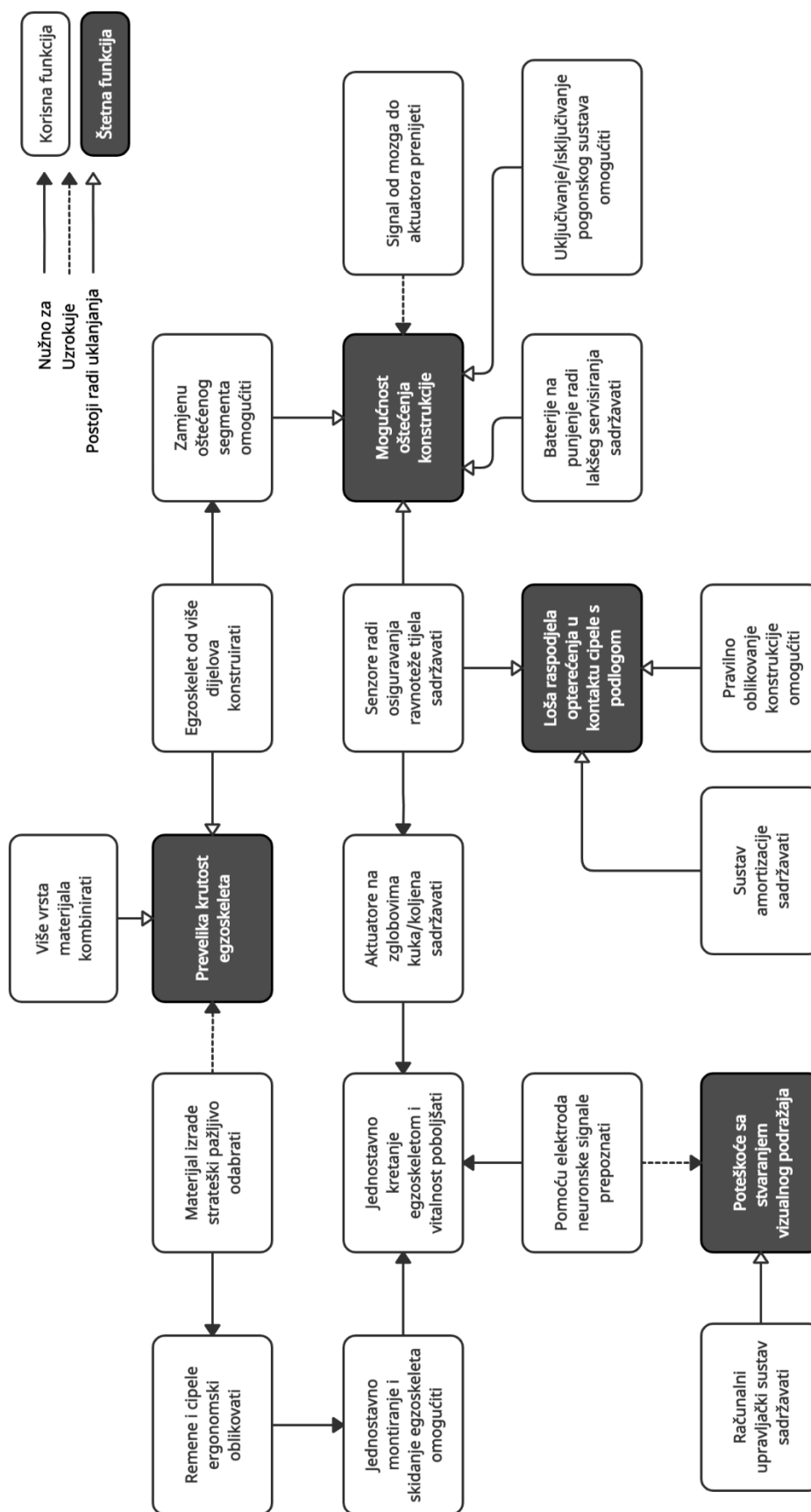
| | |
|---|---|
| Osigurati zadovoljavajuću stabilnost. | Sadržavati računalni upravljački sustav smješten u ruksaku koji se pozicionira na leđa korisnika. On bi tumačio namjeru kretanja korisnika i prenosio bi te informacije u sustav kontrole kretanja. |
| Osigurati automatsko isključivanje u slučaju nekog kvara. | Osigurati sustav amortizacije radi ublažavanja prenesene sile podloge. |
| Omogućiti ručno uključivanje i isključivanje proizvoda. | Ergonomski oblikovati dijelove proizvoda koji dotiču korisnika radi ugodnijeg osjećaja tijekom korištenja proizvoda i kako ne bi došlo do oštećenja kože, mišića i kostiju. |
| Omogućiti vraćanje mobilnosti i poboljšati kvalitetu života. | Sadržavati 7 aktiviranih i kontroliranih stupnjeva slobode po udu. |
| Omogućiti individualni pristup svakom pacijentu tijekom rehabilitacije u bolnicama, klinikama i sl. | Postaviti sjedalicu tj. dodati remene oko zdjelice korisnika kako bi ga se u trenucima nemoći rasteretilo, ako mu je naporno stajati. |
| Omogućiti podešavanje sučelja egzoskeleta. | Postaviti otpornike na stopala za detekciju sile radi orijentacije i mjerenja tlaka između tla i stopala. |
| Omogućiti bežično povezivanje s računalom i mobitelom radi bilježenja rezultata napretka. | Sadržavati mikrofon i kamere radi praćenja kretanja korisnika i komunikacije između egzoskeleta i korisnika. Sadržavati sustav za simulaciju virtualne stvarnosti. |

5.4. Funkcijska struktura i model relacija

Funkcijska struktura predstavlja smislenu i kompatibilnu kombinaciju podfunkcija koje čine ukupnu funkciju. Ukupni cilj razvoja ne može se smatrati potpuno definiranim dok nije jasno prikazan funkcijama. Slika 24. prikazuje funkcijsku strukturu, a Slika 25. model relacija.





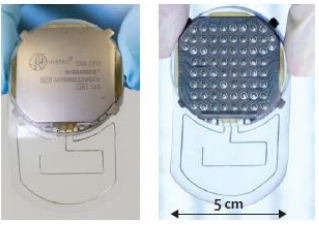






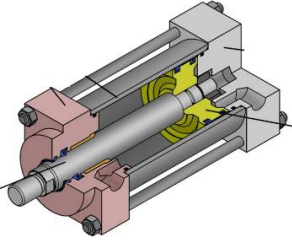
Slika 24. Funkcijska struktura


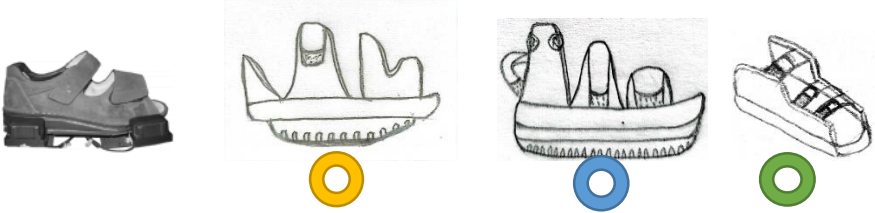
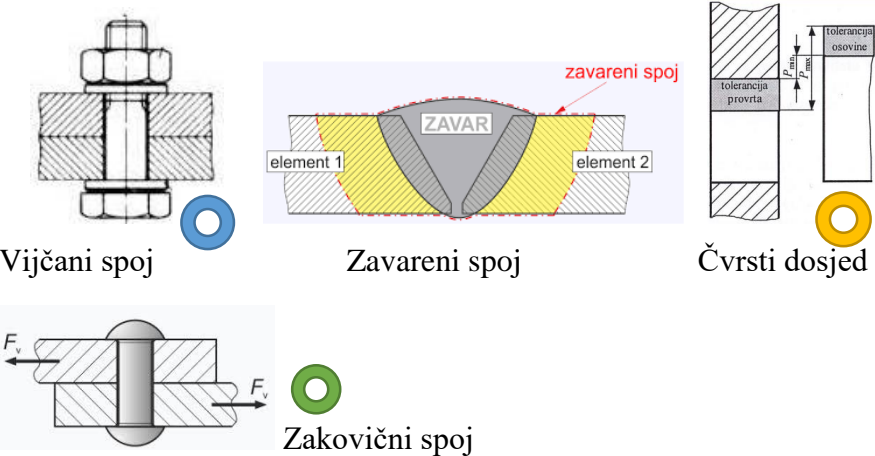
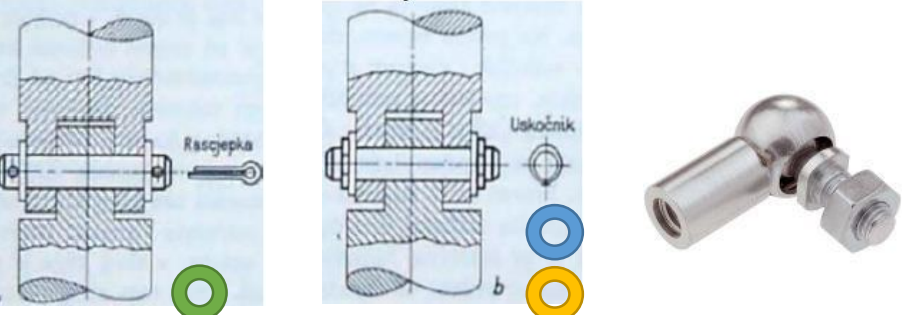
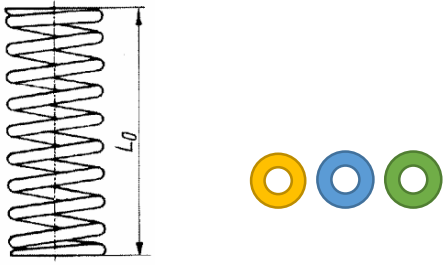


Slika 25. Model relacija

5.5. Morfološka matrica

Tablica 5. Morfološka matrica

| FUNKCIJE | PARCIJALNA RJEŠENJA | | |
|---|---|--|---|
| Signal iz mozga do egzoskeleta dovesti |  <p>Suha EEG kapa</p> |  <p>Comby EEG kapa</p> |  <p>Bežični snimač</p> |
| Jednostavno montiranje i skidanje egzoskeleta omogućiti |  <p>Plastične kopče za remene</p> |  <p>Metalne kopče</p> |  <p>Čičak</p> |
| Podešavanje po visini korisnika omogućiti |  <p>Teleskopsko podešavanje</p> | | |
| Pokretanje egzoskeleta omogućiti |  <p>Električni aktuator</p> |  <p>Hidraulični pogon</p> |  <p>Pneumatski pogon</p> |

| | |
|---|---|
| <p>Stabilnost korisnika osigurati</p> |  <p>Senzori Sjedalica s remenima Pomagala</p> |
| <p>Cipele egzoskeleta ergonomski oblikovati</p> |  |
| <p>Dijelove egzoskeleta od ispadanja osigurati</p> |  <p>Vijčani spoj Zavareni spoj Čvrsti dosjed</p> <p>Zakovični spoj</p> |
| <p>Pokretanje zgloba gležnja omogućiti</p> |  <p>Svornjak + rascjepka Svornjak + uskočnik Kuglasti zglob</p> |
| <p>Prijenos sile podloge na egzoskelet ublažiti</p> |  <p>Torzijska opruga</p> |

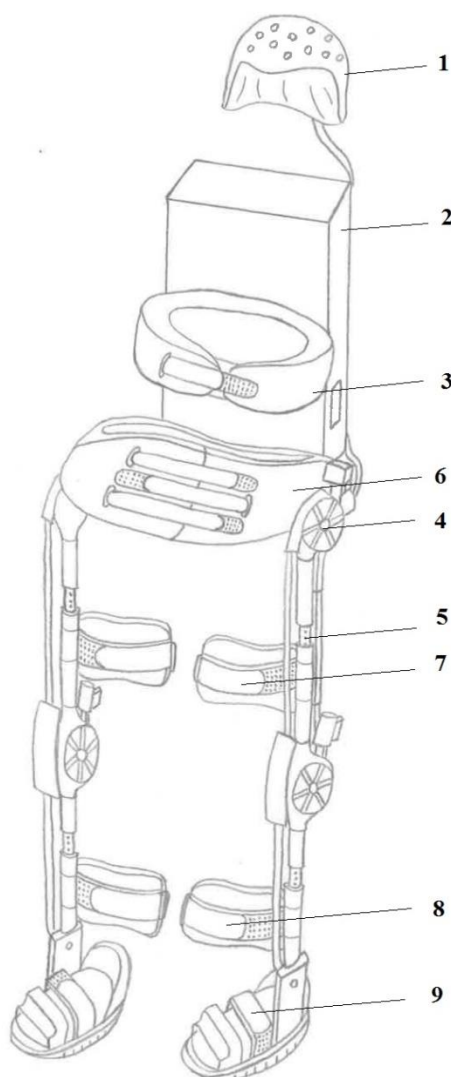
5.6. Generiranje koncepata

Iz prethodnih poglavlja prikazana su trenutna stanja na tržištu egzoskeleta donjih ekstremiteta. Iz tih primjera, kao i iz patenata, usvojene su neke karakteristike i značajke za daljnji razvoj proizvoda. Prema tome, morfološka matrica sadrži već postojeća parcijalna rješenja te potencijalna rješenja za poboljšanje konstrukcije egzoskeleta. Kreativna ideja prvi je korak prema inovaciji. Prema tome, kreirana su 3 koncepta pomoću morfološke matrice. Kao referentni koncept uzeti je egzoskelet *Mindwalker* iz potpoglavlja 2.7. zato što koristi sučelje mozak - računalo sa suhim elektrodama i namijenjen je osobama s ozljedom leđne moždine, tj. paraplegijom. Pogonski sustav, sastavljen od električnih aktuatora s kliznom izvedbom, ostaje nepromijenjen kao i sustav upravljanja te propriocepcija egzoskeleta. *Mindwalker* sadrži 4 aktivna i 2 pasivna zgloba koja su usvojena u sva tri koncepta. Pasivni zglob nalazi se na mjestu gležnja radi lakšeg korištenja egzoskeleta i manje mase.

5.6.1. Koncept 1 (□)

Kada se radi o egzoskeletu donjih udova sa sučeljem mozak - računalo, potrebno je neuronski signal prenijeti do pogonskog sustava egzoskeleta. U tu svrhu koristi se EEG kapa sa suhim elektrodama (1) kao i kod *Mindwalker* egzoskeleta. Računalni sustav (2) nalazi se u tzv. ruksaku koji pacijent nosi na leđima. Pričvršćen je na pacijenta pomoću poliesterskog pojasa (3). Osim EEG kape sa suhim elektrodama, od *Mindwalker* egzoskeleta usvojen je pogonski sustav s električnim aktuatorima (4) te teleskopsko podešavanje (5) po visini pacijenta. Kako bi montiranje i skidanje egzoskeleta bilo što jednostavnije, koriste se remeni na čičak. Na dno ruksaka pričvršćena je zdjelična potporna struktura (6) kao što je vidljivo na Slici 26. Sadrži remene na čičak za podešavanje prema širini kukova pacijenta. Na zdjeličnu potpornu strukturu nastavlja se pogonski sustav i teleskopski podesivi segmenti. Za pričvršćivanje egzoskeleta na noge pacijenta koriste se natkoljениčne (7) i potkoljениčne potpore (8) s čičak remenima. Spojene su na natkoljениčni i potkoljениčni segment s mogućnošću podešavanja po visini egzoskeleta. Cipela egzoskeleta (9) ima mogućnost razdvajanja od ostatka egzoskeleta i sadrži povišeni potplat s urezanim brazdama, jedan čičak remen i jedan fiksni remen s prednje strane cipele. Sa stražnje strane nalazi se fiksni dio koji služi kao potpora cipeli i sprječava ispadanje. Na cipelu je ugrađen integrirani bežični senzorski sustav temeljen na otpornicima osjetljivim na silu radi pružanja kvantitativne analize hoda koji je opisan u potpoglavlju 3.5.

Bluetooth primopredajnik pričvršćen je za stražnji dio cipele. Dorzifleksija i plantarna fleksija kao i inverzija / everzija zgloba gležnja omogućene su pomoću svornjaka učvršćenog uskočnikom. Kako bi se prigušile vibracije i ublažio prijenos sile podloge na egzoskelet, koristi se torzijska opruga postavljena kod cipele egzoskeleta. Slika 26. prikazuje koncept 1.

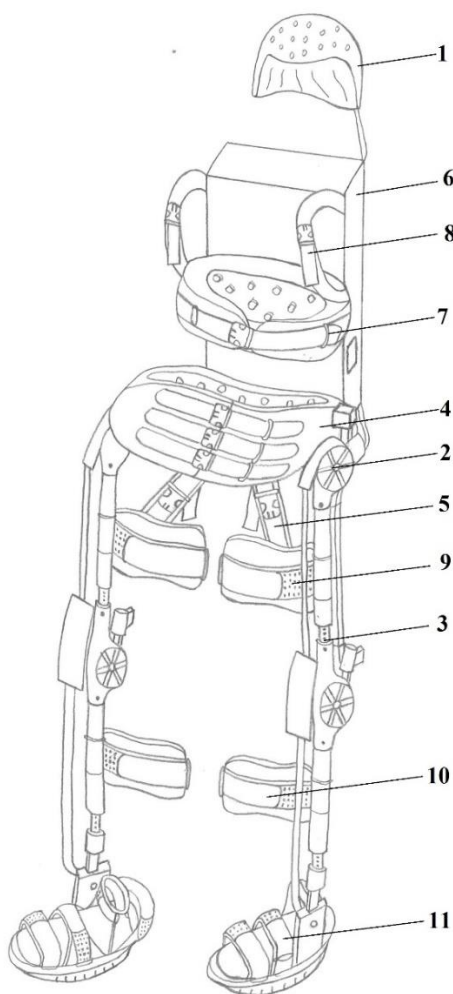


Slika 26. Koncept 1

5.6.2. Koncept 2 (□)

Koncept 2 (Slika 27.) koristi također EEG kapu sa suhim elektrodama (1) kao i koncept 1 čime se omogućuje prijenos neuronskog signala do aktuatora i pacijenti ju mogu svakodnevno

koristiti. Egzoskelet donjih udova sa sučeljem mozak - računalo namijenjen je osobama s ozljedom leđne moždine koje ne mogu samostalno hodati. Pogonski sustav sadrži električne aktuatora s kliznom izvedbom (2) kao i *Mindwalker*. Osim aktuatora, od *Mindwalker* egzoskeleta usvojena je i teleskopska podesivost (3) po visini pacijenta. Kako bi se osobe osjećale sigurnije, tijekom kretanja mogu koristiti i štake kao pomagalo, a na zdjeličnu potpornu strukturu (4) nadodana je tzv. sjedalica s remenima (5). Zdjelična potporna struktura vijčanim je spojem pričvršćena za računalni sustav (6). Sjedalica i zdjelična struktura sadrže plastične kopče kako bi egzoskelet imao mogućnost podesivosti prema antropomjerama pacijenta. Vijčani spoj koristi se za spajanje dvaju segmenta egzoskeleta radi osiguravanja od ispadanja, lakšeg rastavljanja i zamjene dijelova. Tjelesna težina poduprta je poliesterskim pojasom oko struka (7) koji se pričvršćuje plastičnom kopčom. Zdjelična struktura i pojas oko struka obloženi su spužvom radi udobnosti korisnika. Ručke (8) za držanje računalnog sustava usvojene su od *Mindwalker* egzoskeleta, ali su kraće po dužini. Natkoljениčne (9) i potkoljениčne potpore (10) s čičak remenima koriste se radi pričvršćivanja egzoskeleta na noge pacijenta. Egzoskelet ima 4 aktivna i 2 pasivna zglobova. Aktivni zglobovi su zglobovi kuka i koljena, a pasivan zglob je zglob gležnja. Spoj potkoljениčnog segmenta i cipele sastoji se od svornjaka i uskočnika kako bi zglob gležnja imao mogućnost dorzifleksije / plantarne fleksije i inverzije / everzije. Pasivni zglob gležnja s oprugom odabran je kako bi se smanjila složenost i težina egzoskeleta na krajnjim točkama. Opruga omogućuje vraćanje stopala iz plantarne fleksije u dorzifleksiju. Cipela (11) je modificirana i sadrži 5 remena na čičak. Remeni su podesivi kako bi cipelu mogla koristiti veća skupina ljudi. Cipela sadrži senzorski potplat s IMU za mjerenje tlaka po cijelom stopalu i Bluetooth primopredajnik. Koristi se način koji je prikazan na Slikama 17. i 18. Postoje 3 vrste gumenih potplata za cipele koji se mogu izmjenjivati kako bi se egzoskelet mogao kretati po klizavom, neravnom ili suhom podu.

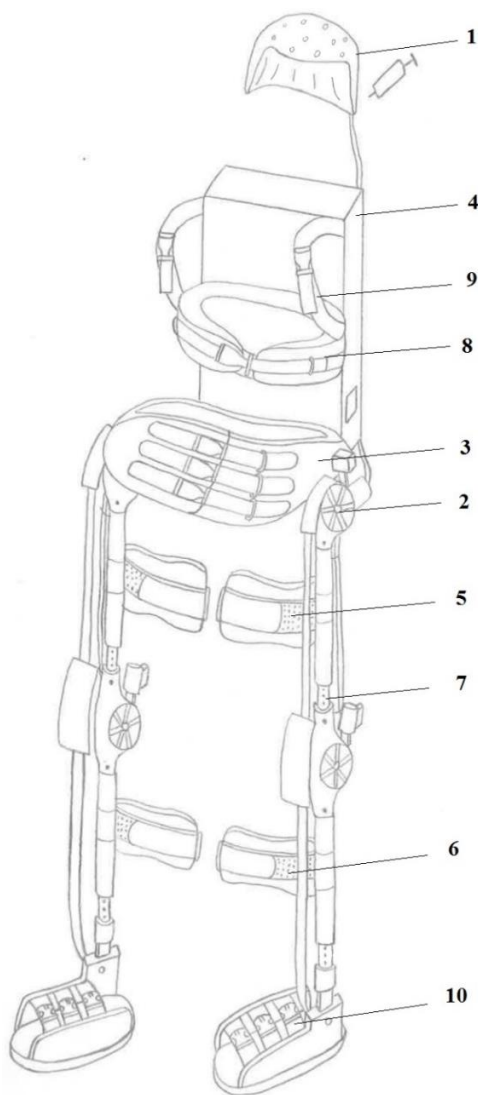


Slika 27. Koncept 2

5.6.3. Koncept 3 (□)

Koncept 3 koristi sučelje mozak – računalo i Comby EEG kapu s elektrodama (1). Kako bi snimanje moždanih signala bilo moguće, između elektroda i kože nanosi se sloj gela. Pogonski sustav, propriocepcija i teleskopska podesivost usvojene su od *Mindwalker* egzoskeleta. Pogonski sustav sastoji se od električnih linearnih aktuatora (2) smještenih na zglobovima kukova i koljena. Spoj zdjeljične potporne strukture (3) i računalnog sustava (4) ostvaren je zakovičnim spojem. Prednost zakovičnog spoja je mogućnost spajanja elemenata izrađenih od različitih materijala. Branici na natkoljenici (5) i potkoljenici (6) spojeni su na teleskopski podesive segmente (7). Sadrže remene na čičak radi pričvršćivanja egzoskeleta na pacijenta. Pojas oko struka (8) i ručke (9) služe za nošenje računalnog sustava (ruksaka) i

sadrže remene s metalnim kopčama. Remeni na zdjeličnoj potpornoj strukturi i na cipeli sadrže metalne kopče kako bi se omogućilo montiranje i skidanje egzoskeleta. Cipela (10) i potkoljenični segment spojeni su svornjakom kako bi se omogućila dorzifleksija / plantarna fleksija i inverzija / everzija zgloba gležnja. Svornjak je učvršćen rascjepkama. Torzijska opruga, smještena u cipeli egzoskeleta, služi kao prigušivač vibracija koje se stvaraju tijekom kretanja. Cipela sadrži i uložak osjetljiv na silu koji služi za mjerenje i analizu raspodjele sile na stopalu pacijenta. Bluetooth modul pričvršćen je na bočnu stranu cipele. Remeni s metalnim kopčama koriste se za pričvršćivanje stopala za cipelu egzoskeleta. Cipela ima zadebljan gumeni potplat s brazdama kako bi se omogućilo lakše kretanje po klizavom i neravnom terenu. Slika 28. prikazuje koncept 3.



Slika 28. Koncept 3

5.7. Vrednovanje koncepata

Mindwalker egzoskelet predstavlja referentni koncept tj. koncept 4. Ostala 3 koncepta vrednovana su prema kriterijima odabira s obzirom na koncept 4, ovisno jesu li prema nekom kriteriju bolji ili lošiji. Koncept 4 ocijenjen je ocjenom 0, dok se koncepti 1, 2 i 3 ocjenjuju ocjenama od -3 do +3. Tablica 6. prikazuje vrednovanje koncepata prema kriterijima odabira.

Tablica 6. Vrednovanje koncepata

| Kriteriji odabira | K1 | K2 | K3 | K4 (REF) |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| Sigurnost | 1 | 3 | 2 | 0 |
| Kompleksnost (broj dijelova) | 1 | -1 | -1 | 0 |
| Prigušivanje vibracija | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Masa egzoskeleta | 0 | -1 | -1 | 0 |
| Trajnost (održavanje) | 0 | 0 | -1 | 0 |
| Rastavljivost | -1 | 0 | -1 | 0 |
| Podesivost | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mobilnost | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Stabilnost | 1 | 2 | 1 | 0 |
| Efikasnost spoja | -1 | 1 | -1 | 0 |
| Ergonomija | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Kompaktnost egzoskeleta | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Prijenos signala | 0 | 0 | -1 | 0 |
| Oblikovanje cipele | 2 | 3 | 2 | 0 |
| Ukupni rezultat | 5 | 9 | 1 | 0 |

Ukupni rezultat pokazuje kako je koncept 2 najbolji za daljnju razradu i potencijalan za proizvodnju. Koncept 2 najsigurniji je za korisnika i stabilniji je radi boljeg oblikovanja cipele. U odnosu na referentni koncept, ova 3 koncepta kompaktnija su i ergonomske bolje oblikovana. Koncept 3 ima najlošiji rezultat zato što koristi elektrode s gelom koje nisu dugotrajne te se moraju mijenjati nakon nekoliko korištenja jer im efikasnost provođenja signala svakim korištenjem opada. Kako koncept 3 sadrži remene s metalnim kopčama, tako je i masa egzoskeleta veća s obzirom na referentni koncept. U konceptu 1 koristi se čvrsti dosjed između pojedinih dijelova (spoj aktuatora i teleskopski podesivih segmenata, spoj bedrene i potkoljениčne potpore s teleskopski podesivim segmentima). Zbog takve izvedbe teško je zamijeniti pojedine dijelove u slučaju kvara. Dijelovi egzoskeleta ne mogu se rastaviti bez razaranja kontaktnih površina spojenih dijelova. Koncept 3 sadrži zakovni spoj na mjestu spajanja zdjelične potporne strukture i računalnog sustava, na spoju aktuatora s teleskopski podesivim segmentima te spajanju bedrene i potkoljениčne potpore na taj segment. S obzirom na to da zakovice čine nerastavljivi spoj, spomenuti elementi mogu se rastaviti jedino razaranjem zakovica. Dijelovi egzoskeleta u konceptu 2 spojeni su vijcima kako bi rastavljivost bila što jednostavnija i bez većih napora.

5.8. Razrada koncepta

Usvojen koncept 2 prikazuje poboljšanu verziju egzoskeletnog sustava za donje udove namijenjenog osobama s paraplegijom. Kako bi se pacijent osjećao sigurno i ugodno tijekom korištenja egzoskeleta, napravljene su neke modifikacije vidljive i na Slici 27. Cilj je tehničkim poboljšanjem konstrukcije postići širu primjenu egzoskeleta i sigurnost korisnika. Kako je opisano u potpoglavlju 5.6.2., neke funkcije ostale su nepromijenjene zbog ne tako jednostavne zamjene. Iz tog razloga egzoskelet koristi serijski elastične aktuator s kontrolom sile. Oni omogućuju različite implementacije upravljanja, npr. bio - inspirirana kontrola i kontrola impedancije. Postoji i gumb START / STOP za ručno pokretanje egzoskeleta postavljen na računalni sustav. Maksimalna brzina hoda iznosi 0,8 m/s. Dopuštena masa pacijenta iznosi 100 kg, dok je dopuštena masa jedne cipele do 1 kg [8]. „Klizne tračnice“ u zdjeličnom pojasu modificirane su tako da se egzoskelet može prilagoditi širini kukova barem do 50 cm. Osnovni tehnički zahtjevi sažeti su u Tablici 7.

Tablica 7. Osnovni tehnički zahtjevi

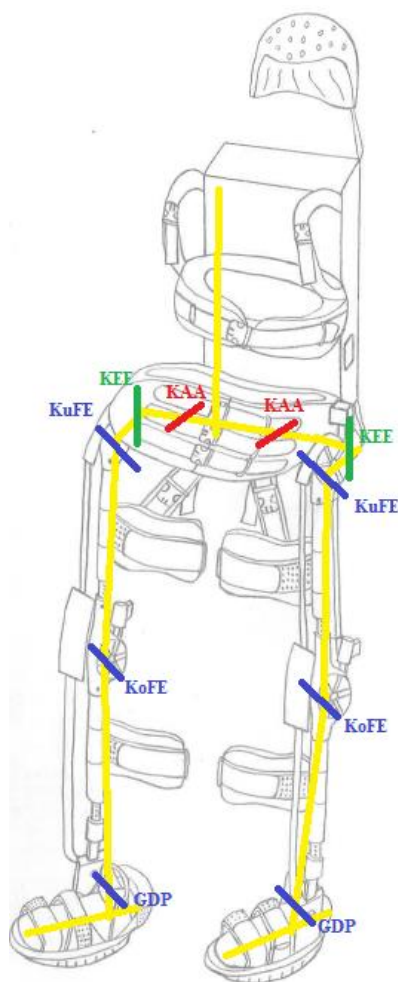
| Tehnički zahtjevi | Dopuštena vrijednost |
|---|----------------------|
| Maksimalna brzina hoda [8] | 0,8 m/s |
| Maksimalna dopuštena masa korisnika [8] | 100 kg |
| Dopuštena visina korisnika [8] | 153 - 188 cm |
| Dopuštena širina kukova korisnika | do 50 cm |
| Duljina cipele korisnika | 24 - 31 cm |
| Dopuštena masa cipela | do 2 kg |
| Stupnjevi slobode gibanja [8] | 3 po nozi |

Kako bi korisnik održavao ravnotežu u sagitalnoj i frontalnoj ravnini, ab / addukcija kuka (KAA), fleksija / ekstenzija kuka (KuFE) i fleksija / ekstenzija koljena (KoFE) moraju biti aktivni stupnjevi slobode gibanja. Zglob gležnja je pasivan jer je cilj dobiti što manju masu egzoskeleta, tj. što laganiji dizajn. Endo / egzo - rotacija kuka (KEE) i dorzifleksija / plantarna fleksija gležnja (GDP) pasivni su i opružni stupnjevi slobode gibanja. Zglob gležnja opremljen je antagonističkim parovima opruga koje postižu ciljanu krutost uz minimiziranje težine (ekvivalentna krutost zgloba je oko 600 Nm / rad). Inverzija / everzija gležnja (GIE) dolazi od spoja s gumenim potplatom. KEE i GIE trebaju biti usklađeni kako bi se smanjio utjecaj okoline i poboljšala udobnost nošenja egzoskeleta. Endo / egzo - rotacija gležnja (GEE) onemogućena je ukrućivanjem tog stupnja slobode gibanja [8]. U Tablici 8. vidljivi su željeni rasponi pokretanja sva 3 zgloba sa 7 stupnjeva slobode gibanja.

Tablica 8. Rasponi pokretanja zglobova [8]

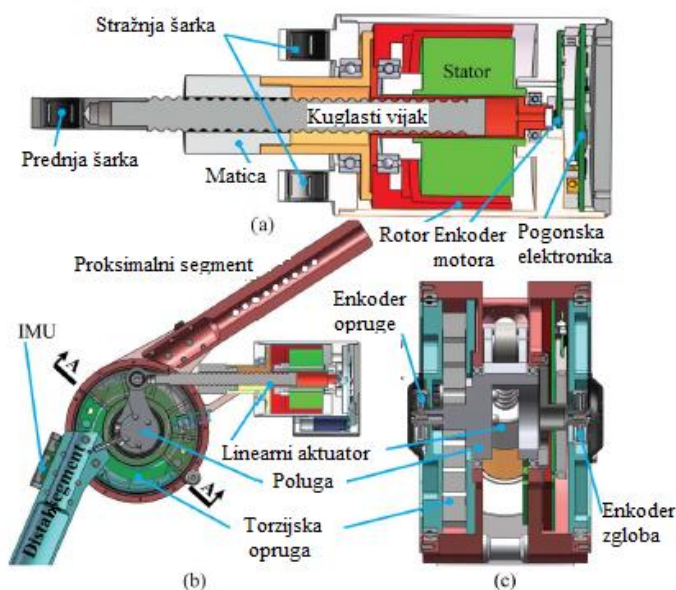
| Zglob | SS gibanja | Aktivnost | Željeni raspon pokretanja zgloba |
|---------|------------|-----------|--|
| Kuk | KAA | Da | 19° abdukcija / 22° addukcija |
| | KuFE | Da | 110° fleksija / 18° ekstenzija |
| | KEE | Ne | ± 10° rotacija |
| Koljeno | KoFE | Da | 120° fleksija / 1,5° ekstenzija |
| Gležanj | GDP | Ne | 20° dorzifleksija / 20° plantarna fleksija |
| | GIE | Ne | 10° inverzija / 10° everzija |
| | GEE | Ne | kruto |

Na Slici 29. ucrtani su aktivni i pasivni opružni stupnjevi slobode gibanja. Osi KAA i KuFE sijeku se u centru zgloba kuka. Osi KoFE i GDP poravnate su s osima zglobova koljena i gležnja. KEE i GDP su pasivni i opružni stupnjevi slobode gibanja.



Slika 29. Stupnjevi slobode gibanja

Kako bi se udovoljilo zahtjevima snage i težine, sustav upravljanja, uključujući elektroniku i aktuator, usvojeni su od egzoskeleta *Mindwalker*. Omjeri snage i težine te okretnog momenta i težine aktuatora moraju bi maksimizirani kako bi se minimizirala težina egzoskeleta. Linearni aktuator sastoji se od kugličnog vijka i potisnika BLDC motora (engl. *Brushless direct current motor*). Motor može prenijeti moment M od 2,5 Nm te snagu P od 1 kW. Masa jednog linearnog aktuatora iznosi 1,1 kg. Opruga je izrađena od jednog komada titana visoke kvalitete i teži 220 g [8]. Na Slici 30. prikazan je sustav pokretanja zglobova.

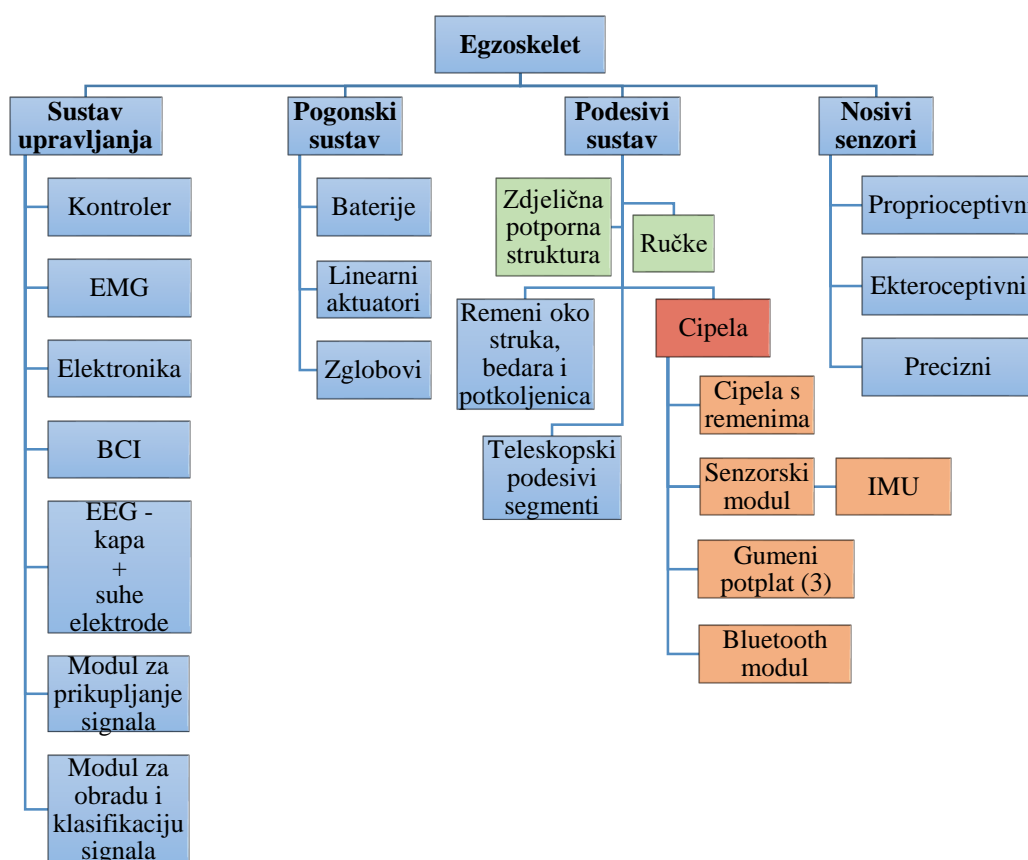


Slika 30. Sustav pokretanja: a) Izgradnja linearnog akuatora; b) Poprečni presjek (prerezan u sagitalnoj ravnini) serije elastičnog zgloba; c) A - A presjek iz b) [8]

U ovom dizajnu egzoskelet je pričvršćen za nositelja na 6 glavnih mjesta. Računalni sustav pričvršćen je ručkama i pojasom oko struka za tijelo korisnika. Ručke i pojas sadrže plastične kopče kako bi se tijelo osiguralo od ispadanja i imaju bolju mogućnost regulacije. Zdjelična potporna struktura sadrži 3 plastične kopče s remenima kako bi se moglo regulirati ovisno o širini struka. Maksimalna širina koja se može postići odgovara širini struka od 50 cm. Jedna od modifikacija jesu remeni s kopčama koji spajaju branik na bedrima i zdjeličnu strukturu te čine takozvanu sjedalicu. Oni nisu zategnuti do kraja već čine oslonac i potporu tijekom obavljanja rehabilitacije. Svi pojasevi i remeni napravljeni su od poliesterske tkanine kako bi egzoskelet imao što manju masu. Pojas oko struka i zdjelična struktura sadrže spužvastu potporu za leđa i zdjelicu kako bi egzoskelet bio ugodan za nošenje. Natkoljencična i potkoljencična potpora izrađene su od tkanine i sadrže remene na čičak koji nisu do kraja stegnuti. Cipelama sadrži 5 remena na čičak kako bi stopalo što čvršće prijanjalo uz cipelu.

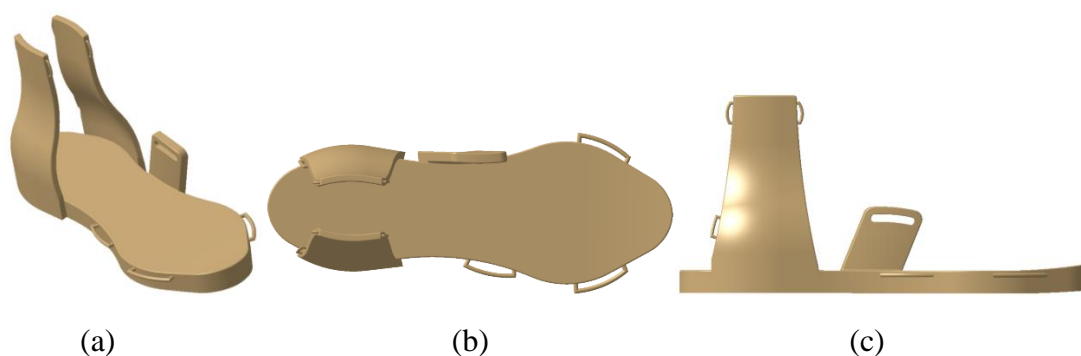
Od *Mindwalker* egzoskeleta usvojeni su segmenti potkoljenice i natkoljenice koji imaju teleskopsku cjevastu strukturu i podesivost po visini korisnika. Kako bi se spriječile smetnje tijekom hoda, potrebno je prilagoditi duljinu i širinu koraka. XCoM (engl. *Extrapolated center of mass*) sustav koristi se upravo iz tih razloga. SWA algoritam (engl. *Step-Width Adaptation*) omogućio je nekim korisnicima hodanje bez vanjske potpore i učinkovit je u

suzbijanju smetnji. SWA je učinio korak širim kako bi se spriječila velika promjena položaja XCoM [8]. Kao što je opisano i u potpoglavlju 2.7., proprioceptivni senzori pomažu pri održavanju ravnoteže tijekom hodanja. Kako bi se predočilo okruženje, koriste se ekteroceptivni senzori kao što su laserski daljinomjer i kamere [7]. Kod *Mindwalker* egzoskeleta koristi se tzv. okruženje virtualne stvarnosti (VR) koje pruža vizualne povratne informacije i eventualno vestibularne povratne informacije. Radi pružanja orijentacije egzoskeleta s obzirom na gravitaciju koristi se inercijska mjerna jedinica (IMU). Kao i kod *Mindwalker* egzoskeleta, po jedan IMU postavljen je između KAA i KEE, jedan na natkoljenci i jedan na potkoljenci segment [8]. Usvojen je i EEG i EMG podsustav upravljanja pomoću kojih se omogućuje izmjena signala između ljudskog tijela i egzoskeleta. Grafičkim prikazom, na Slici 31, prikazan je cijeli sustav egzoskeleta podijeljen na sklopove i podsklopove. Plavo obojeni su usvojeni sklopovi od *Mindwalker* egzoskeleta, zeleno obojeni su modificirani podsklopovi, a crveno obojeni je podsklop „Cipela“ koji je poboljšán u svrhu bolje udobnosti, stabilnosti i pokretljivosti. Sastoji se od cipele s remenima, senzorskog modula s IMU, 3 vrste gumenih potplata koji imaju mogućnost izmjene i Bluetooth modula.



Slika 31. Grafički prikaz sustava egzoskeleta

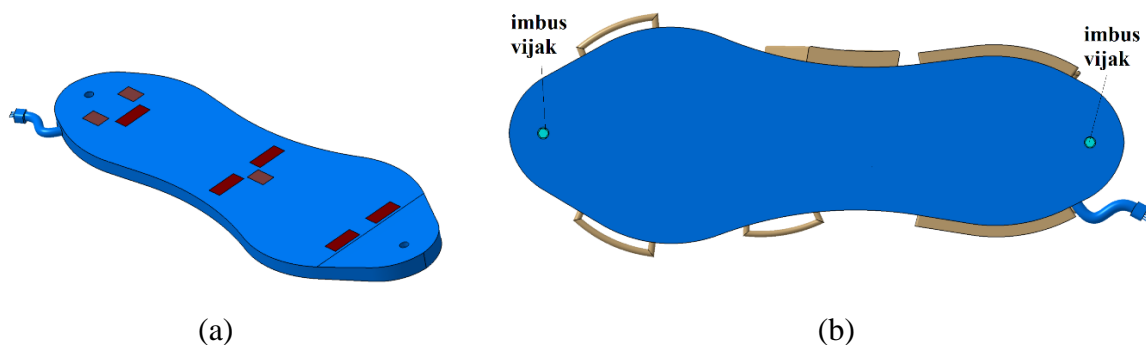
Cipela je unaprijeđena i konstrukcijski izmijenjena radi povećanja sigurnosti i šire primjene egzoskeleta. Izrađena je od kompozita s karbonskim vlaknima. Osim modula s IMU senzorom, cipela sadrži 5 remena na čičak. Prvi remen postavljen je sprijeda, drugi po sredini, treći straga, a posljednja dva remena namijenjena su za pričvršćivanje oko gležnja korisnika. Kako je definirano da je dopuštena visina korisnika između 153 - 188 cm, određena je i duljina potplata obuće prema antropomjerama ženskih i muških osoba. U obzir su uzete mjere potplata od veličine 36 kod žena do veličine 43 kod muškaraca prema europskom standardu. Dakle, prema izmjerama radi se o rasponu od 24 cm do 31 cm. Cipela je namijenjena za obuću kao što su tenisice i cipele. Kako cipela sadrži dovoljan broj remena na čičak, osigurava i obuću ženske osobe duljine 24 cm i obuću muške osobe duljine 31 cm. Kako bi sklop bio što jednostavniji, bez potrebe za produljivanjem ili skraćivanjem cipele, uzeta je duljina cipele od 27 cm. Time je postignut jednostavniji i kompaktniji dizajn, ali i šira primjena. Dizajn takve cipele može se vidjeti na Slici 32. Remeni na čičak dolaze na za to predviđena mjesta prikazana na Slici 32. i napravljeni su od poliesterske tkanine. Poboljšanje konstrukcije cipele napravljeno je u CAD programskom paketu CATIA V5R19.



Slika 32. CAD model cipele: a) Izometrija; b) Tlocrt; c) Bokocrt

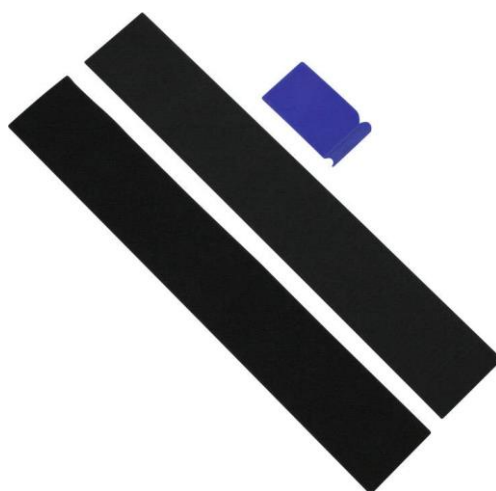
Između potplata i cipele dodan je još po jedan IMU senzorski modul radi mjerenja plantarnog tlaka i dodatnog održavanja ravnoteže kao što je prikazano u potpoglavlju 3.5, Slika 17. Senzorski modul napravljen je od kompozita s karbonskim vlaknima i sadrži 8 senzora raspoređenih po cijeloj plohi kao što je vidljivo na Slici 33.a). Senzori su povezani mekom polimernom pločom pomoću vodljivih niti. Ovaj bežični sustav koristi se za analizu hoda i držanja tijekom korištenja egzoskeleta. Sadrži i kabel za spajanje na Bluetooth uređaj koji služi kao primopredajnik i može se montirati bilo gdje na cipeli. Sustav ima mogućnost povezivanja s računalom ili pametnim telefonom gdje se prikazuju vrijednosti srednjeg i

vršnog tlaka te centra pritiska. Duljina mu je jednaka duljini cipele i sadrži 2 provrta kako bi se imbus vijcima pričvrstio za dno cipele. Korištena su 2 imbus vijka M5 x 8 i mogu se vidjeti na Slici 33.b).



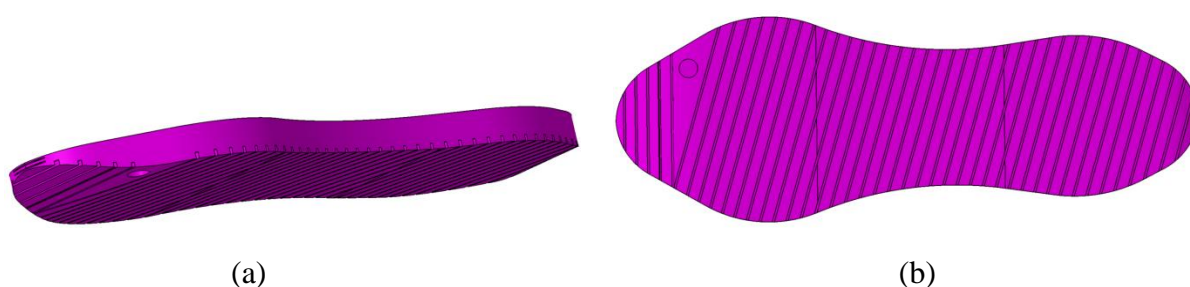
Slika 33. Senzorski modul s IMU sensorima i spoj s cipelom: a) Prikaz senzorskog modula s 8 IMU senzora; b) Tlocrt senzorskog modula s imbus vijcima

Kako bi se egzoskelet mogao koristiti i testirati na suhom, klizavom i mokrom terenu, osmišljena su tri različita gumena potplat. Gumeni potplat dobro ublažuje udarce, što hodanje čini ugodnijim i mekim, otporan je na trošenje i ne klizi. Svaki potplat ima mogućnost montiranja na senzorski modul pomoću čičak trake (Slika 34.). Jedan dio trake postavlja se na potplat, a drugi dio na senzorski modul. Ona je izuzetno čvrsta jer sadrži samoljepljivi film, može se rezati, jednostavna je za korištenje i nije potrebno bušenje.

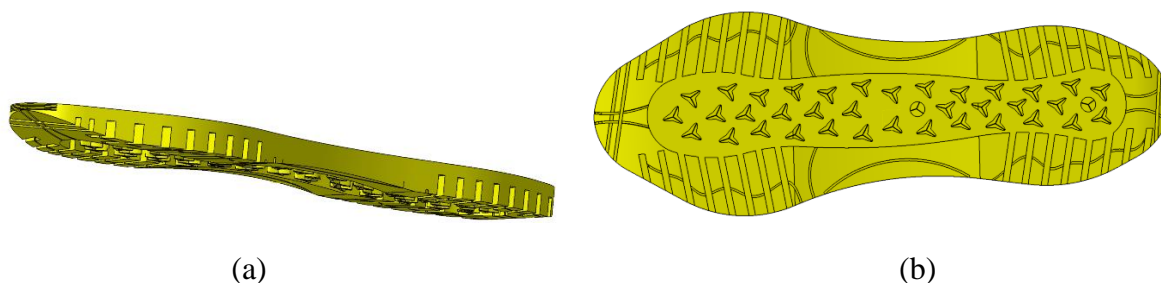


Slika 34. Čičak trake

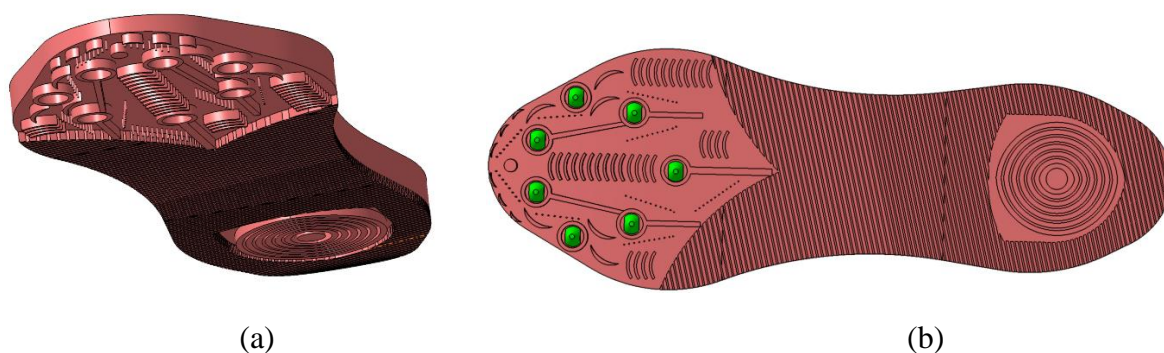
Prvi oblik potplata (Slika 35.) namijenjen je za ravnu i suhu podlogu. Drugi oblik potplata (Slika 36.) može se koristiti na različitim površinama (glatke, neravne). Potplat od gume dobro prianja na podlogu i sadrži ispupčenja od 8,5 mm. Potplat je oblikovan prema cipelama za planinarenje koje imaju veće dubine brazdi radi lakšeg hodanja po kamenju i pijesku. Treći oblik potplata rađen je po uzoru na tenisice za atletiku. Sadrži 7 aluminijskih krampona visine 9 mm s navojem koji se mogu montirati i skidati, kada je potrebna zamjena. Oblikom i materijalom pruža odlično prianjanje na mokroj i klizavoj površini. Slika 37.a) prikazuje gumeni potplat bez krampona, a Slika 37.b) prikazuje gumeni potplat s kramponima.



Slika 35. Gumeni potplat namijenjen za suhu i ravnu podlogu: a) Izometrija; b) Tlocrt

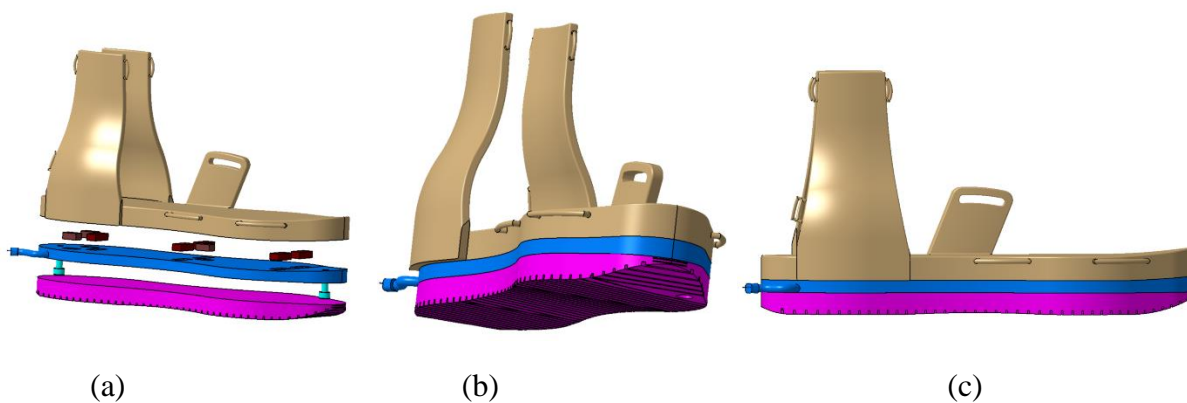


Slika 36. Gumeni potplat namijenjen za neravnu podlogu: a) Izometrija; b) Tlocrt

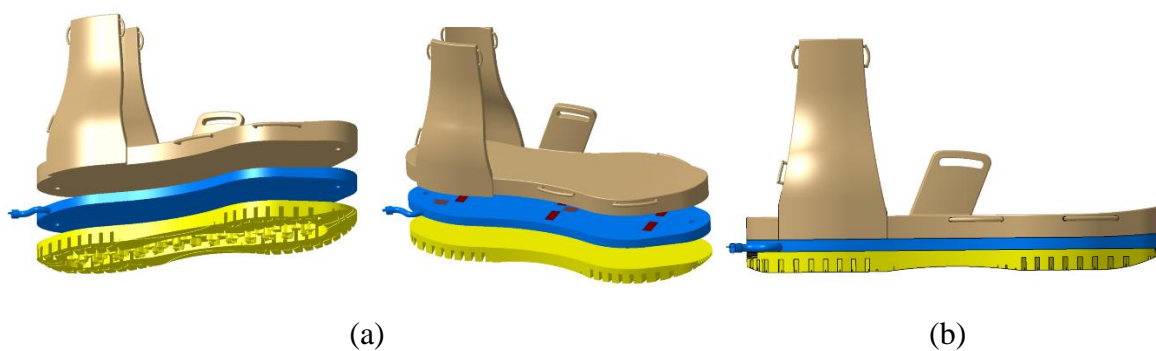


Slika 37. Gumeni potplat namijenjen za mokru i klizavu podlogu: a) Izometrija potplata bez krampona; b) Tlocrt potplata s kramponima

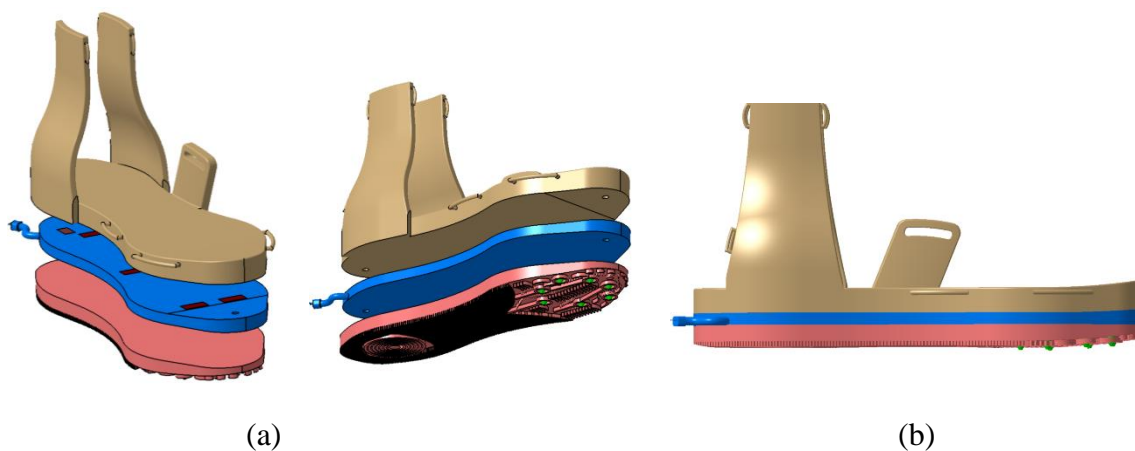
Slike 38., 39. i 40. prikazuju sklopne CAD modele koji se sastoje od cipele, senzorskog modula s IMU sensorima, gumenog potplata i imbus vijaka.



Slika 38. Sklop CAD modela s gumenim potplatom za suhu i ravnu podlogu: a) Rastavljen sklop; b) Sastavljen sklop; c) Bokocrt sklopa



Slika 39. Sklop CAD modela s gumenim potplatom za neravnu podlogu: a) Rastavljen sklop; b) Bokocrt sklopa



Slika 40. Sklop CAD modela s gumenim potplatom za mokru i klizavu podlogu: a) Rastavljen sklop; b) Bokocrt sklopa

Gabaritne mjere pojedinih dijelova sklopa nalaze se u Tablici 9. zajedno s njihovim masama i materijalima. Iako se masa egzoskeleta malo povećala, još uvijek zadovoljava uvjet zadan u Tablici 7. Svrha poboljšanja bila je povećati sigurnost i primjenu egzoskeleta, što je i zadovoljeno. Egzoskelet je otporan na vodu i prašinu. Rehabilitacija više nije ograničena na zatvoren prostor i suhu i ravnu podlogu, već se terapije mogu provoditi i na otvorenom prostoru. Time se omogućuje širenje spektra primjene robotike u rehabilitaciji.

Tablica 9. Vrijednosti osnovnih dijelova modela

| Osnovni dijelovi modela | Dimenzije [mm] (l x b x h) | Materijal | Masa [kg] |
|---|-------------------------------|--------------------------------|-----------|
| Cipela | 270 x 95 x 130 | Kompozit s karbonskim vlaknima | 0,51 |
| Senzorni potplat sa sensorima | 270 x 95 x 7,75 | Kompozit s karbonskim vlaknima | 0,19 |
| Gumeni potplat za suhu i ravnu podlogu | 270 x 95 x 13,5 | Guma | 0,21 |
| Gumeni potplat za neravnu podlogu | 270 x 95 x 13,5 | Guma | 0,15 |
| Gumeni potplat za mokru i klizavu podlogu | 270 x 95 x 13 | Guma | 0,19 |
| Imbus vijak | M5 x 8 | Čelik | 0,003 |
| Krampon | φ8 x 9 | Aluminij | 0,001 |

Prema Tablici 9., ukupna masa jedne cipele iznosi 0,856 kg, ako se koristi gumeni potplat za neravnu podlogu. Masa cipele s gumenim potplatom za mokru i klizavu podlogu iznosi 0,903 kg, dok je najteža cipela s gumenim potplatom za suhu i ravnu podlogu i iznosi 0,916 kg. Ukupna masa cipela ne prelazi 2 kg te je time zadovoljen tehnički zahtjev iz Tablice 7.

6. ZAKLJUČAK

Ovim radom teži se ka unaprjeđenju ljudskog egzoskeleta za donje udove sa sučeljem mozak – računalo (BCI). Konkretno, želi se omogućiti korisniku kretanje i na otvorenom prostoru. Iz tog razloga napravljeno je konstrukcijsko poboljšanje cijele cipele egzoskeleta. Egzoskelet za donje udove najviše se koristi u rehabilitaciji osoba s paraplegijom, a želja je postići i njihovu upotrebu u svakodnevnom životu korisnika. Njegova velika prednost je to što omogućuje paraplegičarima ponovno stajanje na noge čime uvelike olakšava fizioterapeutima rad s pacijentom tijekom rehabilitacije.

U uvodnom djelu rada prikazan je razvoj egzoskeleta kroz godine, napravljen je kratki pregled tržišta i postojećih egzoskeleta koji se koriste u medicini. Za svakog od njih pojašnjen je princip rada i definirana njihova primjena. Mogu se uočiti nedostaci koji se svakim novijim egzoskeletom pokušaju eliminirati. Problem koji se javlja poboljšanjem zapravo je potreba za većim financijskim sredstvima jer tehnologija napreduje i potrebno ju je mijenjati. Pojavom BCI tehnologije, liječenje i rehabilitacija osoba s paraplegijom doživljavaju veliki napredak, no potrebno je više znanja i vještina kako bi se mogla dalje razvijati.

Treće poglavlje objašnjava princip rada sučelja mozak – računalo (BCI), daje uvid u vrste ovakvog sučelja te objašnjava funkciju komunikacijskog protokola. Vidljivo je i na koji se način provode snimanja tijekom testiranja jednog egzoskeleta. BCI tehnologija koristi EEG neinvazivni modalitet za snimanje moždanih signala koji se putem komunikacijskog protokola prenose na BCI operatora. Upravo je to važna funkcija sučelja mozak – računalo za pokretanje egzoskeleta. Najnovije istraživanje koristi invazivan pristup snimanju moždanih signala pomoću bežične veze BCI, no takva primjena nije moguća za veće skupine ljudi. Obrađeno je više vrsta nosivih senzora bez kojih snimanje pokreta egzoskeletnog sustava ne bi bilo moguće.

Nakon pregleda patenata na tržištu, peto poglavlje daje uvid u cijelu konstrukcijsku razradu. Prije samog oblikovanja i detaljiranja, potrebno je izvršiti koncipiranje. Na početku poglavlja napravljena je analiza potreba korisnika i definirane su početne tehničke specifikacije. To

podrazumijeva tehnički upitnik, definiciju cilja i definiranje zahtjeva koje egzoskelet mora zadovoljiti. Nakon toga prikazana je funkcijska struktura zajedno s modelom relacija bez kojih ukupni cilj razvoja nije potpuno definiran. Pomoću parcijalnih rješenja, za pojedine podfunkcije iz morfološke matrice, generirana su tri koncepta. Usporedbom svakog koncepta s referentnim konceptom i vrednovanjem prema odabranim kriterijima, koncept 2 ispada najbolji za daljnju razradu. U programskom paketu CATIA izrađen je CAD model cipele s čičak remenima, čime se povećava sigurnost korištenja egzoskeleta i senzorski modul s IMU dodatno osigurava ravnotežu korisnika. Sigurnost egzoskeleta povećana je i preoblikovanjem zdjelične potporne strukture. Prednost senzorskog modula je mogućnost spajanja na Bluetooth primopredajnik koji ima sposobnost izračunavanja raznih parametara. Poboljšanja odgovaraju muškim i ženskim osobama odrasle dobi i slažu se s osnovnim tehničkim zahtjevima iz Tablice 7. Ideja zamjene gumenog potplata stvorena je kako bi se u bliskoj budućnosti omogućilo korištenje ovakvog egzoskeleta i u privatne svrhe te da bi osobe s paraplegijom mogle funkcionirati u svakodnevnom životu. Imale bi mogućnost kretanja i na otvorenom prostoru, nevezano radi li se o kišovitom, snježnom ili sunčanom danu. Preoblikovanje samog potplata čini egzoskelet stabilnijim i sigurnijim za kretanje.

U daljnjem razvoju cilj je povećati broj aktivnih stupnjeva slobode gibanja, razmisliti o novim rješenjima za pokretanje egzoskeleta i unaprijediti sučelje mozak - računalo. Unaprijeđena cipela predstavlja inovativno rješenje i treba proći testiranja kako bi se mogla koristiti u komercijalne svrhe. Unatoč napretku i obećavajućim rezultatima, potrebno je provesti više istraživanja u svrhu poboljšanja stabilnosti hoda i mogućnosti kretanja paraplegičara bez ičije pomoći. Stvoreni prototip prilagođava se čovjeku prilikom svakog pokreta što i jest cilj razvoja ljudskog egzoskeleta za donje udove.

LITERATURA

- [1] Tariq, M., Trivailo, P. M., Simic, M., *EEG-Based BCI Control Schemes for Lower-Limb Assistive-Robots*, Melbourne, Australija, 2018.
- [2] Štivić I., Završni rad, *Egzoskeleti i njihove primjene*, Zagreb, Hrvatska, 2017.
- [3] Esquenazi, A., Talaty, M., Packel, A., Saulino, M., *the ReWalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor - Complete Spinal Cord Injury*, Elkins Park, Pennsylvania, 2012.
- [4] Jose L., Grossman R., *Neurorex: a clinical neural interface roadmap for eeg - based brain machine interfaces to a lower body robotic exoskeleton*, Osaka, Japan, 2013.
- [5] <https://newatlas.com/rex-robotic-exoskeleton/15736/>, 3.09.2021.
- [6] <https://www.cyberdyne.jp/english/products/HAL/index.html>, 3.09.2021.
- [7] Gancet J., Ilzkovitz M., Cheron G., Ivanenko Y., van der Kooij H., van der Helm F., Zanol F., Thorsteinsson F., *Mindwalker: A brain controlled lower limbs exoskeleton for rehabilitation. Potential applications to space.*, Noordwijk, Nizozemska, 2011.
- [8] Wang, S., Wang, L., Meijneke, C., Asseldonk, E., Hoellinger, T., Cheron, G., Ivanenko, Y., Scaleia, V., Sylos-Labini, F., Molinari, M., *Design and Control of the Mindwalker Exoskeleton*, Noordwijk, Nizozemska, 2015.
- [9] https://www.neurosan.hr/elektroencelografija-eeg/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=eeg&gclid=CjwKCAjwsNiIBhBdEiwAJK4khg8HsS4qAerB8DsyPxtZM4fw_ehqYWCOUUISBk-z7SgD7WUub1MOZhBoCcWYQAvD_BwE, 4.09.2021.
- [10] Wang, C., Wu, X., Wang, Z., Ma, Y., *Implementation of a Brain - Computer Interface on a Lower - Limb Exoskeleton*, Shenzhen, Kina, 2016.
- [11] Benaid, A.L., Costecalde, T., Eliseyev, A., Charvet, G., Verney, A. Karakas, S., Foerster, M., Lambert, A., Moriniere, B., Abroug, N., *An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain - machine interface in a tetraplegic patient: a proof - of - concept demonstration.*, Grenoble, France, 2019.
- [12] Deng, W., Papavasileiou, I., Qiao, Z., Zhang, W., Lam, K., Han, S., *Advances in Automation Technologies for Lower-extremity Neurorehabilitation: A Review and Future Challenges*, Hong Kong, Kina, 2018.

- [13] https://www.mdpi.com/1424-8220/12/7/9884/htm?fbclid=IwAR1cc_ys6fPU7ohK1CS26bCaQ0FZzLsLgNL6Hmqw96PbXAyFd9XPhlpMSkY, 29.10.2021.
- [14] <https://patents.google.com/patent/EP3225363B1/en?q=exoskeleton+bci&oq=exoskeleton+bci>, 4.09.2021.
- [15] <https://patents.google.com/patent/CN104797385B/en?q=brain+computer+interface+exoskeleton&oq=brain+computer+interface+exoskeleton>, 4.09.2021.
- [16] <https://patents.google.com/patent/CN103932870B/en?q=lower+limb+exoskeleton&oq=lower+limb+exoskeleton>, 6.09.2021.
- [17] <https://patents.google.com/patent/CN109044742B/en?q=lower+limb+exoskeleton&oq=lower+limb+exoskeleton>, 6.09.2021.
- [18] <https://patents.google.com/patent/US11071675B2/en?q=lower+limb+exoskeleton&oq=lower+limb+exoskeleton&page=1>, 13.09.2021.
- [19] Štorga, M., Škec, S.: *Prezentacije s predavanja i vježbi (Tehnički upitnik i definicija cilja)*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za konstruiranje i razvoj proizvoda, Kolegij: Razvoj proizvoda, 2020.
- [20] <https://www.conrad.hr/p/iwh-drzac-registarske-plocice-s-cicak-trakom-s-x-v-49-cm-x-8-cm-1399060>, 11.11.2021.

PRILOZI

I. CD-R disc