КазККА Хабаршысы
The Bulletin of KazATC
Вестник КазАТК
ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

ӘОЖ 004.896:615.477
DOI 10.52167/1609-1817-2025-140-5-248-262

Д.Е. Бижанов[1], Б.Т. Шингисов[2,3], Н.Т. Жетенбаев[1], Ә.Қ. Мақсұт[1]
[1]Energo University, Алматы, Казақстан
[2]Satbayev University, Алматы, Казақстан
[3]Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Казақстан
E-mail: n.zhetenbaev@aues.kz

ШЫНТАҚ БУЫНЫНА ОҢАЛТУҒА АРНАЛҒАН РОБОТТАР: ҚАЗІРГІ ШЕШІМДЕР МЕН БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІН ТАЛДАУ

Аңдатпа. Бұл мақала шынтақ буынның қалыпты қозғалысын оңалтуға арналған экзоскелеттердің даму тенденциялары мен басқару жүйелерін талдауға бағытталған. Шынтақ буыны анатомиялық құрылысымен кинематикасы негізге ала отырып, қолданыстағы оңалтуға арналған экзоскелеттердің конструкциялық шешімдерін бір бірмен салыстырдық. Талдау барысында оңалтуға арналған экзоскелеттердің пациентке берген нақты пайдасымен оның клиникада қолдануға және енгізу барысы егжей-тегжейлі сипатталды. Әсіресе зерттеуде экзоскелеттердің қозғалыс траекториясы мен басқару жүйесі импедансқа негізделген басқару әдістеріне көп көңіл бөлінді.

Түйінді сөздер: шынтақ буыны, реабилитациялық робот, импеданс басқару, физиотерапия, жасанды интеллект, қозғалыс траекториясы.

Кіріспе.

Соңғы жылдары инсульт, жүйке жүйесінің аурулары, жарақаттар, автомобиль апаттары және спорттық жарақаттар адамның жұмыс қабілеттілігі мен өмір сапасына айтарлықтай әсер етті. Бұл жағдайлардың көпшілігі иықтың қозғалысын шектейді, ал шынтақ функциясының бұзылуы күнделікті тұрмыстық және кәсіби әрекеттерді орындауды қиындатады [1]. Инсульт мүгедектіктің негізгі себептерінің бірі болып саналады, әсіресе егде жастағы адамдар арасында, өйткені ол қозғалыс дағдылары мен когнитивті функцияларға бірдей әсер етеді [2].

Инсульттан кейінгі алғашқы айларда орталық жүйке жүйесін қалпына келтіру мүмкіндігі жоғары болады. Осы кезеңде нейропластикалық өзгерістер белсенді түрде жүреді және дәл осы уақытта жүргізілген оңалту шаралары ерекше нәтиже береді [3]. Нейропластика-зақымдалған нейрондық байланыстарды жаңа нейрондармен қайта құру немесе алдыңғы байланыстарды күшейту процесі [4]. Бұл құбылыс өздігінен де, физиотерапиялық жаттығулар мен заманауи нейростимуляторлық әдістер арқылы да болуы мүмкін.

Соңғы онжылдықта роботты оңалту жүйелері дәстүрлі физиотерапияға тиімді балама ретінде кеңінен зерттелуде. Мұндай құрылғылар пациенттің қозғалыс белсенділігін дәл өлшеуге, емдік жаттығулардың қарқындылығын реттеуге және оңалту барысын сандық бақылауға мүмкіндік береді [5].

Медициналық оңалту-бұл адамның физикалық мүмкіндіктерін ғана емес, сонымен қатар оның психологиялық және әлеуметтік бейімделу қабілетін қалпына келтіруге бағытталған кешенді процесс [6]. Роботты құрылғыларды қолдана отырып, жаттығу жиілігін арттыруға, қозғалыс ауқымын кеңейтуге және әр пациентке жеке терапия жүргізуге болады. Атап айтқанда, мұндай жүйелердің шынтақ буынын қалпына

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

келтірудегі рөлі ерекше, өйткені бұл буын иық пен білек арасындағы қозғалыстың негізгі буыны болып табылады.

Шынтақ буыны-екі еркіндік дәрежесі бар күрделі анатомиялық құрылым. Ол иілу-жазу және пронация-супинация қозғалыстарын қамтамасыз етеді, сондықтан оны толық қалпына келтіруге бағытталған техникалық шешімдер де дәл және көп функциялы болуы керек [7].

Бұл мақалада шынтақ буынын қалпына келтіруге арналған роботты құрылғылардың қазіргі даму деңгейі мен ерекшеліктері қарастырылады. Құрылғының еркіндік дәрежесіне, қозғалыс түрлеріне, жетек жүйесіне, басқару әдістеріне және қауіпсіздік стандарттарына назар аударылады.

Материалдар мен тәсілдер.

Зерттеу шынтақ буынының қозғалысын қалпына келтіруге арналған заманауи роботты оңалту жүйелерін кешенді талдауға бағытталған. Жұмыс негізінен әдеби деректерді шолу және салыстырмалы талдау әдістеріне негізделген.

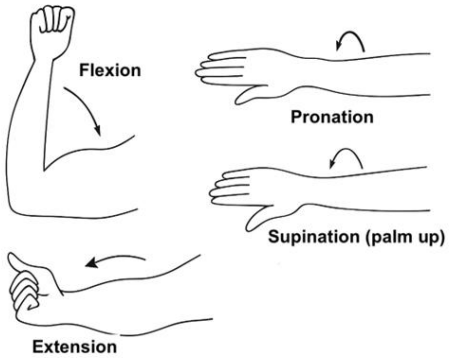
Алдымен шынтақ буынының анатомиялық құрылымы мен биомеханикалық ерекшеліктері егжей-тегжейлі сипатталды. Атап айтқанда, буынның физиологиялық қозғалыс ауқымы анықталды иілу-жазу 0-150 градус, алақанды ішке-сыртқа бұру 80-90 градус, рұқсат етілген максималды сәттер және бұлшықеттердің антагонистік-синергетикалық өзара әрекеттесуі. Бұл деректер оңалту құрылғыларына қойылатын міндетті техникалық талаптарды (қозғалыс ауқымы, күш шегі, инерциялық жүктеме, қауіпсіздікті тоқтату механизмдері) нақты анықтауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер мен талқылау.

Шынтақ буынының кинематикасы.

Шынтақ биомеханикасында әдетте екі еркіндік дәрежесі бар цилиндрлік (топсалы) буын ретінде қарастырылады. Оның қозғалыс ауқымы сүйектердің, байламдардың және бұлшықеттердің өзара шектелуімен анықталады. Жоғарыда айтылғандай, шынтақ буыны қозғалыстың екі негізгі түрін орындайды: иілу-жазу (иілу-созылу) және білектің айналмалы қозғалысы (пронация-супинация).

Иілу және жазу сагиттальды жазықтықта жүреді. Иілу кезінде білек иыққа қарай бүгіліп, қол мен білек арасындағы бұрыш азаяды. Жазу кезінде қол толығымен түзетіліп, бұрыш максималды мәнге жетеді. Клиникалық норма бойынша функционалды иілу 135-150 градус аралығында, ал толық емделу 0-5 аралығында болады -10 градус (яғни, шамалы гиперэкстензия). Дәл осы 150 градус диапазон күнделікті өмірде қолданылатын барлық әрекеттерді (тамақ, жазу, сақтау, киім кию) толығымен қамтамасыз етеді, ал сирек қозғалыстар қажет.



1 сурет - Шынтақ буынының негізгі қозғалыстарының схемасы

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

Пронация мен супинацияны шынтақ буынының өзі емес, радиотолқынды буындар қамтамасыз етеді.біріншіден, бірақ кинематикалық модельде олар шынтақ кешенінің ажырамас бөлігі ретінде қарастырылады. Орташа алғанда, пронация-супинацияның жалпы диапазоны 140-180 градус (70-90 градус пронация + 70-90 градус супинация).

Шынтақ буыны екі дәрежелі еркіндік моделімен сипатталғанымен, ол шын мәнінде үш өте күрделі буындардан (иық, иық және проксимальды) тұратын кешен болып саналады және тек осы екі негізгі салада күнделікті қозғалыстардың 99% орындайды.

Шынтақ буынының екінші маңызды қозғалысының бірі ол білектің айналдыру қозғалысы (пронация және супинация). Бұл қозғалысты негізінен радиус сүйегі ulna-ның айналасында бұрылуы арқылы ғана жүзеге асады.

Супинацияда алақан жоғары қарайды да, ал бас бармақ бүйірге шығады (анатомиялық позиция). Пронацияда керісінше болады алақан төмен қарайды, бас бармақ дене жаққа қарай бұрылады. Клиникалық нормада әр бағыттағы қозғалыс ауқымы әдетте 80–90 градусты құрайды, яғни жалпы айналу осьі 160-180 градус шамасында болады. Кейбір адамдарда супинация 90 градустан асып, тіпті 100 градусқа жетуі мүмкін, ал пронация аздап кем болуы да кездеседі бірақ бәрі жеке анатомияға байланысты.

Бұл мәліметтерді оңалту экзоскелеттерін жобалауда міндетті түрде ескеру керек. Егер құрылғының қозғалыс осі анатомиялық осьпен сәйкес келмесе немесе ауқым шектеулі болмаса артық болса онда пациенттің буынына қосымша жүктеме түседі, байламдар зақымдалуы мүмкін.

1 кесте - Шынтақ буынының негізгі қозғалыстары және олардың кинематикалық сипаттамалары көрсетілген

Қозғалыс түрі	*Жазықтық*	*Айналу осі*	*Қозғалыс сипаттамасы*	*Қозғалыс диапазоны*
Бүгу (Flexion)	Сагитталды	Көлденең ось	Білектің алдыңғы бөлігі иыққа қарай жақындайды	135-150 градус
Жазу (Extension)	Сагитталды	Көлденең ось	Қол түзуленіп, иықтан алыстайды	0-10 градус
Супинация (Supination)	Көлденең айналу	Ұзындық осі	Алақан жоғарыға, бас бармақ сыртқа бағытталады	80-90 градус
Пронация (Pronation)	Көлденең айналу	Ұзындық осі	Алақан төменге, бас бармақ ішке бағытталады	80-90 градус

Шынтақ буынының антропометриясы мен математикалық моделі.

Антропометрия адам денесінің өлшемімен массасын және оның инерциялық сипаттамларын зерттейді және оңалту құрылғысын жобалауда деректер еркіндік дәрежесімен жетек қуатын бекіту нүктелерін нақтылауға мүмкіндік береді.

Шынтақ буынына арналған экзоскелеттер көбіне forearm-hand яғни білек-алақан сегментінің параметірлеріне тәуелді жалпы массасының үлесі $m = a_m M$, ал тиімді ұзындығы $L = \alpha_m H$, масса центріне дейінгі иін мәні $r = \alpha_r L$. Мұндағы М – дене массасы, H – бой, $\alpha_ь$, α_L,α_r – жобалау кезінде клиникалық өлшеудің мәні. J – цилиндрлі сегменттің осіне қатысты.

1) Бүгу-жазу (FE) үшін жалпыланған модель бойынша.

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

Шынтақ буынның бүгу-жазуы сагитталды жазықтықта жүреді және жалпыланған координат ретінде θ бұрышын енгізіледі және гравитация әсерін ескерсек, Лагранж функциясы былай болады:

$$L = T - V,$$

түрінде жазылады, мұндағы

$$T = \frac{1}{2}(J + mr^2)\dot{\theta}^2, V = mgr\sin(\theta + \gamma).$$

Мұндағы g- еркін түсу үдеуі, γ- иіннің гравитацияға қатысты офсеті ол қолдың бастапқы қалпына байланысты болады және Эйлер-Лагранж теңдеуі былай жазылады:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau - b\,\dot{\theta},$$

нәтижесінде қозғалыс теңдеуі былай болады:

$$(J + mr^2)\,\ddot{\theta} + b\,\dot{\theta} + mgr\cos(\theta + \gamma) = \tau. \quad (1)$$

Мұнда τ - жетек ассистив моменті, b - тұтқыр демпфирлеу. Бұндағы (1) теңдеуі бақылау заңын синтездеуде базалық модель ретінде қолданылды.

2) Пронация-супинация (PS) үшін айналу моделі үшін

Пронация мен супинацияда негізгі айналу осі білектің бойымен бағытталады, сондықтан ауырлық күші моменті елеусіз қалады модель көбіне инерция тұтқырлық сипатынан тұрады:

$$T_{\text{PS}} = \frac{1}{2}J_{\text{ps}}\dot{\varphi}^2, V_{\text{PS}} \approx 0.$$

Эйлер-Лагранждан теңдеуі:

$$J_{\text{ps}}\,\ddot{\varphi} + b_{\text{ps}}\,\dot{\varphi} = \tau_{\text{ps}}, \quad (2)$$

мұнда J_{ps} - пронация/супинация осіне қатысты инерция моменті, b_{ps} - тұтқырлық, τ_{ps} - жетек моменті. Бұл канал үшін жылдамдықты реттеуі және импеданс контроллері қолайлы болады.

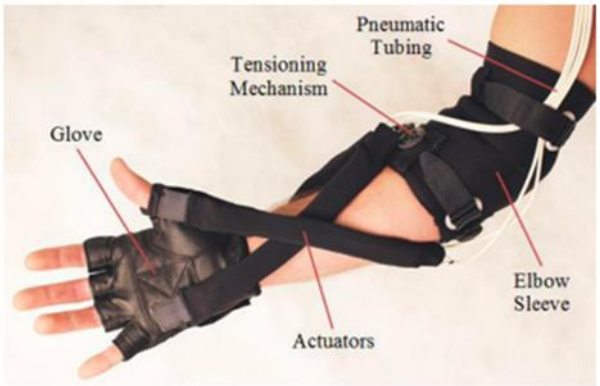
Шынтақ буынын оңалтудың классификациясы.

Шынтақ буынының қозғалысын оңалтуға арналған роботталған құрылғыларын екі негізгі бағытқа бөлуге болады [14]: ол құрылымдық ерекшеліктеріне және терапия түріне байланысты болады. Реабилитация (оңалту) роботтардың классификация 2 суретте көрсетілгендей.

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

2 сурет - Шынтақ буынына арналған оңалту роботтарының классификациясы

Құрылымдық тұрғыдан алғанда, шынтақ буынына арналған оңалту құрылғылары экзоскелеттік және соңғы эффекторлы (end-effector) типтерге бөлінеді. Экзоскелеттік жүйелер адамның қол құрылымын қайталай отырып, бірнеше буын нүктелерінде денеге бекітіледі. Мұндай құрылғылардың кинематикасы табиғи шынтақ қозғалысына сәйкес келеді және нақты бір буын қозғалысын оқшау бақылауға мүмкіндік береді (3 сурет) [15].



3 сурет - Жеңіл және икемді экзоскелеттік құрылғының мысалы - клиникадан тыс қолдануға бейімделген жүйе [15]

Соңғы эффекторлық роботтарда (end-effector systems) науқастың білегі немесе алақаны құрылғының бір интерфейсіне қосылады. Бұл тәсіл құрылым мен басқару жүйесін жеңілдетеді және механикалық сәйкессіздік қаупін азайтады. Алайда, мұндай жүйелерде иықтың нақты кинематикасын анықтау және буындардың жеке қозғалысын бақылау қиынырақ.

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

4 сурет - Федералды Уберландия университетінде (UFU) жасалған WReD құрылғысының прототипі [16]

Экзоскелеттік типтегі құрылғылар көбінесе киюге болатын конфигурацияларда болады. Бұл қозғалысты қолдауға және күшейтуге арналған электромеханикалық жүйелер [17]. Кейбір модельдерде пневматикалық бұлшықеттер қолданылады, олар пациент пен құрылғының өзара әрекеттесуіне табиғи түрде әсер етеді және буындардың сәйкессіздігін азайтады.

5 сурет - Шынтақ буынына арналған соңғы эффекторлы прототип мысалы [17]

Шынтақ буынының терапевтік оңалту роботтары қозғалыс кезінде көмек көрсету сипатына қарай үш топқа бөлінеді:

- белсенді;
- пассивті;
- және екі жақты (айна) жүйелер [18].

Белсенді құрылғылар қозғалысты бір немесе бірнеше жетектер арқылы тікелей орындайды және қозғалыс белсенділігі шектеулі науқастарға арналған. Пассивті құрылғылар өздігінен қозғала алатын науқастарда қарсылық немесе қозғалыс бағыты ретінде әрекет етеді.

Екі жақты (екі жақты) жүйелер зардап шеккен қолдың айна бейнесінде сау қолдың қозғалысын көшіру принципін қолданады. Бұл тәсіл алғаш рет MIME (Mirror-Image Motion Enabler) жүйесінде енгізілді, содан кейін кеңінен қабылданды.

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

6 сурет - Берлин Еркін университетінде әзірленген компьютермен басқарылатын активті робот [18]

Пассивті терапия кезінде пациент белсенді күш салмайды. Осы бағыттағы құрылғылар бөлінеді:

- үздіксіз пассивті қозғалыс жүйелері (CPM-үздіксіз пассивті қозғалыс) және
- пассивті көмекші құрылғылар.

CPM жүйелері қозғалысты толығымен автоматты түрде орындайды, ал көмекші құрылғылар қозғалысты реттегішті енгізбестен, бірақ сенсорлық кері байланыс арқылы жүзеге асырады [19].Белсенді құрылғылар пациенттің бұлшықет белсенділігін немесе моторлық ниетін тіркейді және сәйкесінше көмек немесе қарсылық көрсетеді.

- белсенді-көмекші жүйелер қозғалысты жеңілдетеді;
- белсенді-резистивті жүйелер, керісінше, қозғалтқыштың бейімделуін арттыру үшін қарсы күш жасайды.

Қазіргі уақытта шынтақ буынына арналған бірқатар роботтық жүйелер клиникалық сынақтардан сәтті өтті және оңалту робототехникасының тиімділігін айтарлықтай арттырды. Келесі бөлімде олардың техникалық шешімдері мен басқару әдістері егжей-тегжейлі қарастырылады.

Шынтақ буынын оңалтуға арналған құрылғылар.

Бұл шолу шынтақ буынының қозғалысын оңалтуға арналған роботты оңалту жүйелерін дамыту салаларын қамтиды. Құрылғының еркіндік дәрежесіне, олар жүзеге асыратын қозғалыс түрлеріне, жетек және басқару әдістеріне, кері байланыс арналарына, клиникалық және эксперименттік бағалауға, қауіпсіздік пен қолданбалы технологияларды біріктіруге (мысалы, ойын терапиясы және жасанды интеллект элементтері) назар аударылады.

Шынтақ буынын оңалтуға арналған құрылғылар [20] жұмыста Массачусетс технологиялық институтында (MIT) жасалған үш дәрежелі еркіндік құрылғысы сипатталған. Жүйе адам мен роботтың өзара әрекеттесу күші төмендеген күш сенсоры мен моментті тікелей басқару алгоритмін қолданады. 2007 жылы енгізілген бұл құрылғы клиникалық сынақтарда шынтақ пен білек қозғалысының дәлдігін арттырды. [21] өз зерттеуінде Сингапур Ұлттық университеті пронация мен супинация және иық иілу қозғалыстарын орындау үшін екі дәрежелі еркіндік құрылғысын ұсынды. Қарапайым механикалық сұлбаға негізделген бұл жүйе дистальды аймақтағы мотор белсенділігі қолдың жалпы мотор функцияларына оң әсер ететінін көрсетті. [22] Rice University зерттеушілері өз жұмыстарында импеданс негізінде басқарылатын ricewrist электр қуатымен жұмыс істейтін құрылғыны ұсынды. Бұл құрылғы позиция мен күш

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

контроллерін біріктіре отырып, табиғи қозғалысты жоғары дәлдікпен қайталайды. Кейінірек мәліметтер [23] жетілдірілген нұсқасын ұсынды - RiceWrist-s жүйесі, оның механикалық қаттылығы мен моменті жоғарылаған. Оның зерттеуінде [24] openwrist құрылғысы RiceWrist-s модификациясы ретінде қарастырылды, ол пассивті төртінші еркіндік дәрежесін қосу арқылы қозғалыс ауқымын кеңейтті. [25] UHD (Universal Haptic Device) жүйесі бар бұл құрылғы шынтақтың үш негізгі қозғалысын қамтамасыз етеді (иілу/жазу, пронация/супинация және бұру/бұру). Зерттеуде [26] иық, шынтақ және білек қозғалыстарын біріктіретін бірдей еркіндік дәрежесі бар экзоскелет ұсынылған. Құрылғы буынның нақты қозғалысын тіркейді және толық қолдың нейромеханикалық параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді. [27] жұмыста Генуя технологиялық институты (IIT Genova) әзірлеген үш дәрежелі еркіндік жүйесі сипатталған; ол шынтақтың иілу/жазу және айналу қозғалыстарын табиғи түрде орындауға мүмкіндік береді. Зерттеуде [28] Шеффилд университетінің SCRIPT-1 құрылғысы талданады. Бұл пассивті оңалту жүйесі инсульттан кейінгі науқастарға арналған және физиотерапиялық режимде шынтақтың иілу / жазу қозғалыстарын орындайды. [29] жұмыста Гарвард университетінде жасалған пневматикалық жетекті құрылғы сипатталған және қозғалыс диапазоны мен моменттің арақатынасы зерттелген. Зерттеуде [30] көрсетілген WRES экзоскелеті - иілу/жазу, пронация/супинация және бұру/шығару қозғалыстарын орындауға қабілетті үш еркіндік дәрежесі бар жүйе. [31] Кюсю университетінде жасалған WReD құрылғысы қарапайым құрылыммен және бір еркіндік дәрежесімен ерекшеленеді. [32] жұмыс CR2-Haptic жүйесін ұсынады-бағытты өзгерту арқылы үш негізгі қозғалысты жаттықтыра алатын қайта конфигурацияланатын портативті құрылғы. [33] зерттеу екі серіппелі элементтерге негізделген сызықтық жетек жүйесі бар экзоскелетті сипаттайды. Бұл шешім дизайнның икемділігін арттырғанымен, қозғалыс дәлдігі мен басқару тұрақтылығын төмендетті. [34] жұмыста шынтақты бүгу/жазу қозғалысы үшін құрылғыда үш дәрежелі еркіндік күші сенсоры қолданылды, бұл адамның қозғалысқа тигізген Күшін дәл бағалауға мүмкіндік береді. Жұмыста [35] осы құрылғыны кеңейтілген еркіндік дәрежелерімен толықтыру мүмкіндігі ұсынылған. [36] зерттеу Берлин Еркін университетінің айналы екі жақты терапия жүргізетін роботын сипаттайды. Ал деректер [37] кедергіні басқаруға негізделген UFU университетінің арзан прототипін ұсынады. Бұл жүйенің құны шамамен 1000 долларды құрайды және инсульттан кейін де, сау қатысушыларда да сыналған. Құрылғының құны мәселесі көптеген зерттеулерде толық қарастырылмаған. Коммерциялық сатылатын жалғыз жүйе MIT Wrist Robot, бірақ ол қазір тоқтатылды. [38] және [39] еңбектерінде оңалту роботтарының тиімділігі тек техникалық сипаттамалармен ғана емес, сонымен қатар экономикалық қол жетімділікпен де өлшенуі керек делінген. Қарапайым механикалық шешімдер мен стандартты жетектерді пайдалану құрылғының бағасын айтарлықтай төмендетеді және оның клиникалық қолданылуын кеңейтеді.

3 кесте - Шынтақ буынын оңалтуға арналған құрылғылардың салыстырмалы сипаттамалары

№	Құрылғы атауы	Еркіндік дәрежесі (DOF)	Қозғалыс түрлері	Басқару тәсілі	Зерттеу ұйымы	Ерекшеліктері
1	MIT Elbow Robot	3	Бүгу/жазу, айналу, әкету/әкелу	Күш сенсоры, тікелей басқару	MIT	Коммерциялық нұсқасы бар
2	Tactile	2	Ашу/жабу	Қарапайым механика	Сингапур	Жеңіл құрылым,

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

	Device		, айналу		Ұлттық университеті	тактильді әсер
3	RiceWrist	3	FE, PS, RU	Импеданс негізіндегі	Rice University	Жоғары момент пен дәлдік
4	OpenWrist	4 (1 пассивті)	Толық қозғалыс аймағы	Жетілдірілген басқару	Rice University	Кең жұмыс кеңістігі
5	UHD	3	FE, PS, RU	Буын тізбегі	Белгісіз	Буындарды бөлек белсендіреді
6	IIT Genova	3	FE, PS, RU	Белсенді	IIT Genova	Белсенді қозғалыс ауқымын кеңейтеді
7	SCRIPT-1	1	FE	Пассивті	Sheffield University	Инсульттен кейін қолдануға арналған
8	Harvard Device	2	FE, PS	Пневматикалық жетек	Harvard University	Жұмсақ жетектер, қауіпсіз әсер
9	WRES	3	FE, PS, RU	Белгісіз	Белгісіз	Үш DOF экзоскелет
10	WReD	1	FE	Экзоскелет	Kyushu University	Қарапайым конфигурация
11	CR2-Haptic	1	Қайта бағыттала тын 3 қозғалыс	Қайта конфигурацияланатын	Белгісіз	Портативті құрылғы
12	2-Linear Actuator Exo	2	FE, RU	Серіппелі элементтер	Белгісіз	Икемді, бірақ дәлдігі төмен
13	Force Sensor Exo	1+	FE	Күш сенсоры + кеңейтілген басқару	Белгісіз	Өзара әрекет сапасын арттырады
14	Berlin Robot	1	FE	Айна тәрізді терапия	Freie Universität Berlin	Екіжақты басқару тәсілі
15	UFU Prototype	1	FE (импеданс)	Импеданс негізіндегі	UFU	Арзан өндіріс (~1000 USD)

Бұл кестеде шынтақ буынына арналған әртүрлі роботты оңалту құрылғылары жүйеленген. Әрбір жүйе еркіндік дәрежесі, қозғалыс түрі, басқару әдісі, зерттеу орны және бірегей ерекшеліктері бойынша салыстырылады. Мұндай талдау инженерлер мен клиниктерге нақты қажеттіліктерге жауап беретін құрылғыны таңдауға және болашақ жүйелерді оңтайландыру бағыттарын анықтауға мүмкіндік береді.

Шынтақ буынына арналған басқару жүйелері.

Шынтақты қалпына келтіруге арналған роботтардың көпшілігі - MIT Elbow Robot, UHD, IIT Genova жүйесі, WReD экзоскелеті және UFU сияқты модельдер-кедергіні басқаруға негізделген. Бұл басқару тәсілі пациенттің қозғалысына жауап ретінде роботтың серпімділігі мен динамикалық кедергісін реттейді, табиғи және қауіпсіз қозғалысты қамтамасыз етеді. Кедергіні басқару жүйесі жетектерден, Сенсорлардан, Контроллерден және есептеу блогынан тұрады, олардың өзара әрекеттесуі пациенттің қолындағы механикалық кедергіні имитациялауға мүмкіндік береді.

Кедергіні басқару Адам мен машинаның өзара әрекеттесуін қажет ететін көптеген роботтық жүйелерде тиімді деп танылады. Оның басты артықшылығы-белгісіз немесе

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

өзгермелі динамикасы бар объектілермен жұмыс істеу кезінде тұрақтылықты сақтау мүмкіндігі. Неврологиялық зақымданған науқастарда бұл қасиет әсіресе маңызды, өйткені қозғалыстың әр сәтінде бұлшықеттердің икемділігі мен реакциясы өзгереді. Мұндай жағдайларда дәстүрлі позициялық немесе қуатты басқару тұрақсыздыққа әкелуі мүмкін, ал импеданс контроллері қозғалысты тегіс және қауіпсіз етеді. OpenWrist құрылғысында белсенді және пассивті көмек режимдері PD басқару арқылы орындалады (пропорционалды-дифференциалды) және шектеулі қозғалыстар кедергі контроллері арқылы орындалады. Бұл жағдайда пациент қолын "виртуалды тұтқыр ортада" еркін қозғалта алады, бірақ белгілі бір шектен шығуға тырысқанда, құрылғы қарсы момент жасайды. Контроллер кіріс ретінде орын ауыстыру және күш мәндерін пайдаланады, ал PD параметрлері қозғалыс тегістігі мен жауап беру уақытына әсер етеді. RiceWrist-s нұсқасында assist-as-Needed (aan) типті Басқару стратегиясы жүзеге асырылды. Бұл жүйе пациенттің белсенділік деңгейін автоматты түрде бағалайды және қажетті қозғалыста тек минималды көмек көрсетеді. Бұл тәсіл қозғалтқыш функцияларын табиғи түрде қалпына келтіруге бағытталған, өйткені құрылғы пациенттің күш-жігерін толығымен алмастырмайды, тек жетіспейтін бөлікті толтырады. SCRIPT prototype 1 (SP1) - шынтақ, білек және саусақ буындарын қамтитын пассивті ортотикалық жүйе. Ол инсульттан кейін пациенттерде байқалатын спастикалық реакцияларды азайтуға бағытталған, бірақ белсенді қозғалысты бақыламайды - ол тек пассивті қозғалтқыш режимінде жұмыс істейді.

Көптеген оңалту роботтарында басқарудың негізгі принципі қозғалыс траекториясын дәл бақылау болып табылады. Бұл әдіс қозғалыс белсенділігі төмен науқастарда пассивті жаттығулар жасауға мүмкіндік береді және оңалту процесін жеңілдетеді. Траекторияны бақылауға негізделген басқару жүйелерін мотивациялық элементтермен (мысалы, ойын терапиясы немесе визуалды кері байланыс) біріктіру пациенттің белсенді қатысуын арттырып, тиімділікті арттыруы мүмкін.

Оңалту роботының басты талабы-пациенттің қауіпсіздігін қамтамасыз ету. Бұл талаптарға IEC 80601-2-78: 2020 халықаралық стандарты жауап береді. Ол медициналық электромеханикалық құрылғыларға қойылатын жаһандық талаптарды анықтайды және Роботты оңалту жүйелерін жобалауда негізгі нұсқаулық ретінде пайдаланылады.

Шынтақ экзоскелетінің қауіпсіздігіне үш негізгі фактор әсер етеді:

– жұмыс диапазондары-рұқсат етілген бұрыштар және буын қозғалысының жылдамдығы;

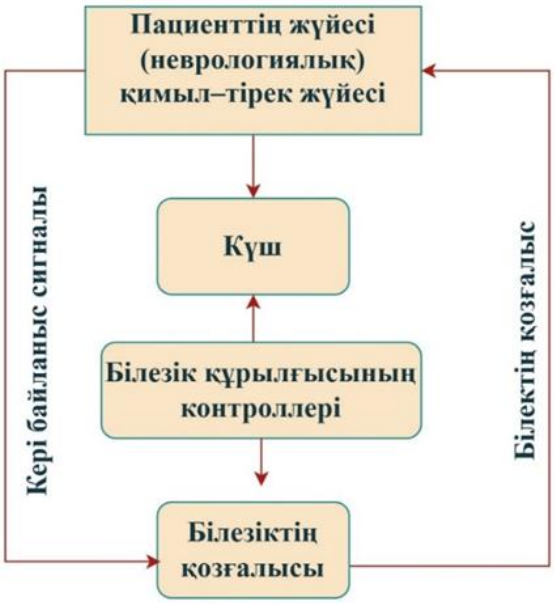
– жұмыс режимдері-пассивті, белсенді немесе көмекші терапия;

– қолданылатын күш пен сәттер-науқастың тініне әсер ететін механикалық жүктеме.

Қозғалыс диапазондарын, үдеулерді және сәттерді физиотерапевт алдын-ала белгілейді және пациенттің жарақат алу қаупін болдырмау үшін бағдарламалық немесе физикалық шектеулермен бекітіледі.

Бұл суретте пациенттің нейромоторлық белсенділігі мен құрылғы арасындағы байланыс көрсетілген: пациенттің моторлық ниеті (нейроимпульстер мен бұлшықет белсенділігі) сенсорлармен өлшенеді және контроллермен өңделеді. Контроллер кері байланыс сигналы ретінде дискілерге момент немесе күш пәрменін жібереді. Осылайша, қозғалыс кезінде адам мен робот арасындағы әрекет үздіксіз реттеледі және бейімделгіш және қауіпсіз орта жасалады.

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025



7 сурет - Шынтақ экзоскелетінің пациентпен өзара әрекеттесу сызбасы

Қаржыландыру. Бұл зерттеуді ҚР Ғылым және Жоғары Білім Министрлігі қаржыландырды, № AP27508009 гранты.

Қорытынды.

Шынтақ буынын қалпына келтіруге арналған роботты оңалту жүйелері қазіргі заманғы оңалту медицинасының қарқынды дамып келе жатқан бағыттарының бірі болып табылады. Мұндай құрылғылар қайталанатын қозғалыстарды жоғары дәлдікпен орындауға мүмкіндік береді және әр пациенттің жеке моторлық ерекшеліктеріне бейімделген терапияға жағдай жасайды. Мақалада қарастырылған құрылғылар құрылымдық шешімдерде, еркіндік дәрежелерінде, басқару әдістерінде және клиникалық тиімділікте айтарлықтай айырмашылықтарға ие. Олардың ішінде кедергіні басқару, траекторияны бақылауға негізделген басқару және сенсорлық кері байланыс жүйелері ең кең таралған тәсілдер ретінде ерекшеленеді. Бұл әдістер қозғалыстың табиғи және қауіпсіз болуын қамтамасыз ету арқылы пациент пен құрылғының өзара әрекеттесуін жақсартады. Құрылғыларды жобалау кезінде тек кинематикалық дәлдікке ғана емес, сонымен қатар қауіпсіздік стандарттарын сақтау мәселелеріне (мысалы, IEC 80601-2-78:2020) және биологиялық үйлесімділікті қамтамасыз етуге ерекше назар аудару қажет. Болашақ зерттеулердің бағыты жасанды интеллектті, адаптивті басқару алгоритмдерін және Виртуалды шындық технологияларын біріктіруге бағытталуы керек. Мұндай интеграция оңалту процесін интеллектуалды, интерактивті және пациенттің нақты жағдайына бейімделетін жүйеге айналдырады. Нәтижесінде шынтақ буынын функционалды қалпына келтірудің тиімділігі артады және оңалту процесі қол жетімді және тиімді болады.

ӘДЕБИЕТТЕР

[1] Bizhanov Dauren Zhetenbayev Nursultan, Balbayev Gani, Kassymbek Ozhikenov, Kuzembay Serikbol Yussupova Saltanat. Structural design of a rehabilitation

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

robot for the upper limb, AIP Conference Proceedings, 2nd International Conference on Electronics, Engineering Physics, and Earth Science, EEPES 2023 Hybrid, Kavala https://doi.org/10.1063/5.0195728

[2] Bizhanov Dauren., Nursultan Zhetenbayev., Gani Balbayev., Beibit Shingissov., Nussibaliyeva Arailym., Yussupova Saltanat.Development and simulation of a device for upper limb rehabilitation, 62nd International Conference on Vibroengineering in Almaty, Kazakhstan, February 10-11, 2023, pp. 29-35. https://doi.org/10.21595/vp.2023.23167

[3] Д.Е. Бижанов., Н.Т. Жетенбаев., Б.Т. Шингисов., А. Б. Нусибалиева., Д. О. Сейсенова. Обзор и анализ экзоскелетов верхней конечности для реабилитации, Вестник КазАТК № 1 (124), 2023, https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-124-1-315-323

[4] Takahashi, C.D.; Der-Yeghiaian, L.; Le, V.; Motiwala, R.R.; Cramer, S.C. Robot-based hand motor therapy after stroke. Brain 2008, 131 Pt 2, 425-437. [5]Д.Е. Бижанов., М.Б. Ғани., Н.Т. Жетенбаев., У. Б. Адилбаева., А. Б. Нусибалиева. Исследование роботов с тросовым приводом, Вестник КазАТК № 2 (131), 2024, https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-131-2-223-240 [6] Mayetin, U.; Kucuk, S. A low cost 3-DOF force sensing unit design for wrist rehabilitation robots. Mechatronics 2021, 78, 102623.

[5] Eschweiler J, Li J, Quack V, Rath B, Baroncini A, Hildebrand F, Migliorini F. Anatomy, Biomechanics, and Loads of the Wrist Joint. Life (Basel). 2022 Jan 27;12(2):188. doi: 10.3390/life12020188. PMID: 35207475; PMCID: PMC8880601.

[6] Rainbow MJ, Wolff AL, Crisco JJ, Wolfe SW. Functional kinematics of the wrist. Journal of Hand Surgery (European Volume). 2015;41(1):7-21. doi:10.1177/1753193415616939

[7] Eschweiler, J.; Li, J.; Quack, V.; Rath, B.; Baroncini, A.; Hildebrand, F.; Migliorini, F. Anatomy, Biomechanics, and Loads of the Wrist Joint. Life 2022, 12, 188. https://doi.org/10.3390/life12020188

[8] Krukhaug, Y. (2014). Biomechanics and Kinematics of the Wrist. In: Hove, L., Lindau, T., Hølmer, P. (eds) Distal Radius Fractures. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54604-4_4

[9] Bouteraa, Y.; Abdallah, I.B.; Boukthir, K. A New Wrist-Forearm Rehabilitation Protocol Integrating Human Biomechanics and SVM-Based Machine Learning for Muscle Fatigue Estimation. Bioengineering 2023, 10, 219. https://doi.org/10.3390/bioengineering10020219

[10] Garcia, G.F.; Gonçalves, R.S.; Carbone, G. A Review of Wrist Rehabilitation Robots and Highlights Needed for New Devices. Machines 2024, 12, 315. https://doi.org/10.3390/machines12050315

[11] Aslam, M., Rajbdad, F., Khattak, S. and Azmat, S. (2017), Automatic measurement of anthropometric dimensions using frontal and lateral silhouettes. IET Comput. Vis., 11: 434-447. https://doi.org/10.1049/iet-cvi.2016.0406

[12] Zha Q, Xu Z, Cai X, Zhang G and Shen X (2023) Wearable rehabilitation wristband for distal radius fractures. Front. Neurosci. 17:1238176. doi: 10.3389/fnins.2023.1238176

[13] Bartlett, N.W.; Lyau, V.; Raiford, W.A.; Holland, D.; Gafford, J.B.; Ellis, T.D.; Walsh, C.J. A soft robotic orthosis for wrist rehabilitation. J. Med. Devices 2015, 9, 030918.

[14] Gonçalves, R.S.; Brito, L.S.F.; Moraes, L.P.; Carbone, G.; Ceccarelli, M. A fairly simple mechatronic device to train the movement of the human wrist. Int. J. Adv. Robot. Syst. 2020, 17, 1-15.

[15] Al-Mayahi, W.; Al-Fahaam, H. A Brief Review of Rehabilitation Wearable Robots for the Upper and Lower Limbs. Int. J. Emerg. Trends Eng. Res. 2023, 11, 291-306.

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

[16] Hesse, S.; Schulte-Tigges, G.; Konrad, M.; Bardeleben, A.; Werner, C. Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2003, 84, 915-920.

[17] Lambercy, O.; Dovat, L.; Yun, H.; Wee, S.K.; Kuah, C.W.; Chua, K.S.; Gassert, R.; Milner, T.E.; Teo, C.L.; Burdet, E. Effects of a robot-assisted grasping and pronation/supination training on chronic stroke: A pilot study. J. Neuroeng. Rehabil. 2011, 8, 63.

[18] Durand, S.; Rohan, C.P.; Hamilton, T.; Skalli, W.; Krebs, H.I. Passive Wrist Stiffness: The Influence of Handedness. IEEE Trans. Biomed. Eng. 2019, 66, 656-665.

[19] Lambercy, O.; Dovat, L.; Yun, H.; Wee, S.K.; Kuah, C.W.; Chua, K.S.; Gassert, R.; Milner, T.E.; Teo, C.L.; Burdet, E. Effects of a robot-assisted grasping and pronation/supination training on chronic stroke: A pilot study. J. Neuroeng. Rehabil. 2011, 8, 63.

[20] Kadivar, Z.; Sullivan, J.L.; Eng, D.P.; Pehlivan, A.U.; Malley, M.K.O.; Yozbatiran, N.; Berliner, J.D.O.; Boake, C.; Francisco, G.E. Rice Wrist Robotic Device for Upper Limb Training: Feasibility Study and Case Report of Two Quadriplegic Persons with Spinal Cord Injury. Int. J. Biol. Eng. 2012, 2, 27-38.

[21] Pehlivan, A.U.; Sergi, F.; Erwin, A.; Yozbatiran, N.; Francisco, G.E.; O'Malley, M.K. Design and validation of the RiceWrist-S exoskeleton for robotic rehabilitation after incomplete spinal cord injury. Robotica 2014, 32, 1415-1431.

[22] Perry, J.C.; Rosen, J.; Burns, S. Upper-Limb Powered Exoskeleton Design. IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2007, 12, 408-417.

[23] Oblak, J.; Cikajlo, I.; Matjačić, Z. Universal haptic unit: A robot for rehabilitation of arms and wrists. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2010, 18, 293-302.

[24] Ren, Y.; Kang, S.H.; Park, H.S.; Wu, Y.N.; Zhang, L.Q. Developing a multi-joint upper limb exoskeleton robot for diagnosis, therapy, and outcome evaluation in neurorehabilitation. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2013, 21, 490-499.

[25] Squeri, V.; Masia, L.; Giannoni, P.; Sandini, G.; Morasso, P. Wrist rehabilitation in chronic stroke patients by means of adaptive, progressive robot-aided therapy. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2014, 22, 312-325.

[26] Amirabdollahian, F.; Ates, S.; Basteris, A.; Cesario, A.; Buurke, J.; Hermens, H.; Hofs, D.; Johansson, E.; Mountain, G.; Nasr, N.; et al. Design, development and implantation of a hand/wrist exoskeleton for home rehabilitation after stroke—SCRIPT project. Robotica 2014, 32, 1331-1346.

[27] Bartlett, N.W.; Lyau, V.; Raiford, W.A.; Holland, D.; Gafford, J.B.; Ellis, T.D.; Walsh, C.J. A soft robotic orthosis for wrist rehabilitation. J. Med. Devices 2015, 9, 030918.

[28] Buongiorno, D.; Sotgiu, E.; Leonardis, D.; Marcheschi, S.; Solazzi, M.; Frisoli, A. WRES: A new 3 DoF WRist ExoSkeleton with tendon-oriented differential transmission for neuro-rehabilitation and teleoperation. IEEE Robot. Autom. Lett. 2018, 3, 2152-2159.

[29] Xu, D.; Zhang, M.; Xu, H.; Fu, J.; Li, X.; Xie, S.Q. Interactive compliance control of a wrist rehabilitation (WReD) device with enhanced training safety. J. Healthc. Eng. 2019, 2019, 6537848.

[30] Khor, K.X.; Chin, P.J.H.; Yeong, C.F.; Su, E.L.M.; Narayanan, A.L.T.; Rahman, H.A.; Khan, Q.I. Portable, reconfigurable wrist robot improves hand function for post-stroke individuals. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2017, 25, 1864-1873.

[31] Higuma, T.; Kiguchi, K.; Arata, J. Low-profile two-degree-of-freedom wrist exoskeleton device using multiple spring blades. IEEE Robot. Autom. Lett. 2018, 3, 305-311.

[32] Mayetin, U.; Kucuk, S. A low cost 3-DOF force sensing unit design for wrist rehabilitation robots. Mechatronics 2021, 78, 102623.

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

[33] Mayetin, U.; Kucuk, S. Design and Experimental Evaluation of a Low Cost, Portable, 3-DOF Wrist Rehabilitation Robot with High Physical Human-Robot Interaction. J. Intell. Robot. Syst. 2022, 106, 65.

[34] Hesse, S.; Schulte-Tigges, G.; Konrad, M.; Bardeleben, A.; Werner, C. Robot-assisted arm trainer for the passive and active practice of bilateral forearm and wrist movements in hemiparetic subjects. Arch. Phys. Med. Rehabil. 2003, 84, 915-920.

[35] Gonçalves, R.S.; Brito, L.S.F.; Moraes, L.P.; Carbone, G.; Ceccarelli, M. A fairly simple mechatronic device to train the movement of the human wrist. Int. J. Adv. Robot. Syst. 2020, 17, 1-15.

[36] Khor, K.X.; Chin, P.J.H.; Hisyam, A.R.; Yeong, C.F.; Narayanan, A.L.T.; Su, E.L.M. Development of CR2-haptic: A compact and portable rehabilitation robot for wrist and forearm training. In Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), Kuala Lumpur, Malaysia, 8-10 December 2014; pp. 424-429.

[37] Oblak, J.; Cikajlo, I.; Matjacić, Z. Universal haptic unit: A robot for rehabilitation of arms and wrists. IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2010, 18, 293-302.

Dauren Bizhanov, doctoral student, lecturer, Energo University, Almaty, Kazakhstan, d.bizhanov@aues.kz

Beibyt Shingisov, PhD, associate professor, Satbayev University, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, b.shingisov@alt.edu.kz

Nursultan Zhetenbayev, PhD, Energo University, Almaty, Kazakhstan, nursultan.zhetenbaev@mail.ru

Anuar Maksut, master, lecturer, Energo University, Almaty, Kazakhstan, a.maksut@aues.kz

REHABILITATION ROBOTS FOR THE ELBOW JOINT: ANALYSIS OF MODERN DESIGNS AND CONTROL SYSTEMS

Abstract. The article discusses current trends in the development of robotic rehabilitation systems designed to restore movement in the elbow joint. The authors compare various design solutions and control methods, taking into account the anatomical and biomechanical features of the elbow joint. The study presents kinematic and mathematical models of rehabilitation devices, evaluates their functional effectiveness and clinical application possibilities. The issues of motion trajectory control, impedance control, and patient safety are described in detail. In conclusion, ways to increase the adaptability and effectiveness of rehabilitation systems through the integration of artificial intelligence technologies and virtual learning environments are proposed.

Keywords: elbow joint, rehabilitation robot, impedance control, physiotherapy, artificial intelligence, motion trajectory.

Даурен Бижанов, докторант, преподаватель, Energo University, Алматы, Казахстан, d.bizhanov@aues.kz

Бейбіт Шингисов, PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Казахстан, b.shingisov@alt.edu.kz

ISSN 1609-1817 (Print)
ISSN 2790-5802(Online)
DOI 10.52167/1609-1817 №5 (140) 2025

Нұрсұлтан Жетенбаев, PhD, Energo University, Алматы, Казахстан, nursultan.zhetenbaev@mail.ru
Әнуар Мақсұт, магистр, преподаватель, Energo University, Алматы, Казахстан, a.maksut@aues.kz

РОБОТЫ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ЛОКТЕВОГО СУСТАВА: АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматриваются современные тенденции развития роботизированных реабилитационных систем, предназначенных для восстановления движений в локтевом суставе. Авторы сравнивают различные конструктивные решения и методы управления с учетом анатомических и биомеханических особенностей локтевого сустава. В исследовании представлены кинематические и математические модели реабилитационных устройств, дана оценка их функциональной эффективности и возможностей клинического применения. Подробно описаны вопросы управления траекторией движения, контроля импеданса и безопасности пациента. В заключение предлагаются пути повышения адаптивности и эффективности реабилитационных систем за счет интеграции технологий искусственного интеллекта и виртуальных обучающих сред.

Ключевые слова: локтевой сустав, реабилитационный робот, импедансное управление, физиотерапия, искусственный интеллект, траектория движения.

Қабылданған күні: 2024 жылғы 28 тамыз
Рецензиядан өткен күні: 2025 жылғы 03 шілде
Мақұлданған күні: 2025 жылғы 08 тамыз