

Н.Т. Жетенбаев¹, А. Жауыт¹, Ғ.Қ. Балбаев², Қ.А. Алипбаев¹, Б.Т. Шингисов²

¹Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы, Қазақстан

²Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан
E-mail: n.zhetenbaev@aes.kz

ТОБЫҚ БУЫНЫН ОҢАЛТУҒА АРНАЛҒАН 3-PRS РОБОТ МАНИПУЛЯТОРЫН ҚҰРАСТЫРУ

Аңдатпа. Мақаланың маңыздылығы - оңалту робототехникасы саласындағы назар аударарлық ғылыми жетістік болып табылатын тобық буынын оңалту үшін жаңа 3-PRS робот манипуляторын әзірлеу. Тобық буынын оңалту үшін арналған роботты құрылғы, 3-PRS механизмі тобық буынындағы қозғалыстың дәлдігі мен бақылауын қамтамасыз етеді, бұл оны оңалту мақсаттары үшін бірегей және инновациялық құрал етеді.

Мақалада роботтың әлеуеті де көрсетілген 3-PRS манипуляторы робототехника саласындағы кеңірек зерттеулерді ілгерілету, оның ерекше дизайны мен басқару механизмдері, оңтайлы параметрлерді анықтау үшін кинематикалық оңтайландыру әдісі қолданылды.

Мақаланың ғылыми жаңалығы 3-PRS механизмін және тобық буынын оңалту нәтижелерін жақсарту үшін жекелендірілген кері байланыс механизмдерін пайдаланатын жаңа робот-манипуляторды әзірлеуге, сондай-ақ оның робототехника саласындағы кеңірек зерттеу саласына үлес қосу әлеуетіне қатысты.

Түйінді сөздер. Параллель робот, параллель манипулятор, оңалту роботы, тобық буыны, 3-RPS.

Кіріспе.

Адамның тобық буыны – бұл адам қаңқасының өте күрделі құрылымы және қозғалыс кезінде күштер мен моменттердің берілуінде маңызды рөл атқарады [1]. Тобық буын бұзылуына немесе күнделікті өмірде жасайтын қозғалыс ауқымының шектелуіне әкелетін көптеген факторлар бар. Адамның тобық буыны – бұл артық салмақ, шамадан тыс физикалық белсенділік немесе егде жастағы адамдарда оның жетіспеушілігі, туа біткен патологиялардың салдарынан адам ағзасындағы ең ауыр буындардың бірі [1-2].

Бұл фактор адамдардың өмір сүру сапасы мен қоршаған ортаға тәуелділігін сипаттайды. Жүру бұзылыстарының жиі кездесетін себептері [3] неврологиялық бұзылулар мен инсульт, жұлынның зақымдануы және Паркинсон сияқты жарақаттар. Бұл жағдайларды емдеу үшін физиотерапия қажет.

Робототехникалық шешімдер жаяу жүру қабілеті бұзылған науқастарды оңалтуға мүмкіндік беретін арзан құрылғыларды жасау қажеттілігін анықтады. Тобық буынын қалпына келтіруге арналған жаңа құрылғы 3-RPS қайта конфигурациялауға параллель манипулятор адамдарға жарақаттан кейін науқастарды қалпына келтіру үшін сәтті қолданылатын төменгі және жоғарғы аяқтың тобық буын функцияларын қалпына келтіруге көмектеседі.

Өкінішке орай, Қазақстанда оңалту үшін робот-манипуляторларды дамытуға көңіл бөлінбейді. Бірақ біздің еліміз мұнда алғашқы қадамдарын жасап жатыр. Алайда, манипулятор роботтары тек адамның қолына арналған. Әлемдік ғылым көрсетіп отырғандай, бүгінде жаңартылатын роботтардың әлеуеті өте жоғары. Олардың болашағы бар екені анық.

Ұсынылған робот-манипулятор тобық буынын қозғалысқа келтіретін өте күрделі дизайнға ие болуы мүмкін. Адамның аяқтарында көптеген еркіндік дәрежесі бар, және оларды түзеу қиын немесе тіпті мүмкін емес жағдай. Негізгі табан мен тобық буыны, олардың әрқайсысы тегіс қозғалыстарды қамтамасыз етеді. Бұл буындарда пайда болатын күштер қажетті қозғалысқа байланысты өзгереді. Отыру орнынан тұру сияқты кейбір қозғалыстар тобық буыны арқылы айтарлықтай күш жұмсауды ғана емес, сонымен қатар бүкіл дененің масса центрінің координациялық қозғалысын да қажет етеді. Барлық осы күштер мен үйлестіру қозғалыстарын қайталау қалыпты жағдай емес. Осылайша, робот-манипулятордың күрделілігін азайту үшін ол күнделікті өмірдің белгілі бір қимылдарын ғана келтіру үшін жасалады. 3-RPS робот манипуляторда тек тобық буынына ғана қатыстырылады, себебі ол қозғалыста үлкен күшті талап ететін негізгі рольді атқарады және негізгі тірек болып табылады.

Ақаулықтар туындаған жағдайда көмек көрсетуге арналған 3-RPS робот-манипуляторы мобильді болады. Алайда, осы прототипті жасау кезінде сымсыз немесе борттық құрылғыларды қосу қажеттілігін болдырмау үшін құрылғы байланыстырылған күйде қалады. Бұл стандартты контроллерлер мен нақты уақыт сенсорларын пайдалануға мүмкіндік береді, сонымен қатар 3-RPS робот-манипуляторының негізін құрайтын алгоритмге зерттеуді бағыттау үшін жағдай жасайды. Кез-келген дизайн процесі сияқты, 3-RPS робот-манипуляторды жасау кезінде ескерілуі және оңтайландыруы керек белгілі бір параметрлерге ие болады.

Бұл жұмыс келесідей бөлімдерден тұрады. Кіріспе бөлімінде роботқа қойылатын талаптар қарастырылады, содан кейін жұмыста ұсынылған тобық буынына арналған роботтың жұмыс принципі қысқаша сипатталады. 2-ші бөлімде зерттеу әдістемесінде роботты науқастың талаптарына бейімдеуге бағытталған шешім, яғни роботты басқару жүйесінің қыр-сыры егжей-тегжейлі түсіндірілетін болады. 3-ші бөлімде пациентті оңалтудың әртүрлі режимдері кезінде және қозғалтқыштың кірісі мен платформаның бағытына байланысты сызықты электр жетектің керілуі және қозғалтқыштың айналу моменттерінің параметрлері туралы ақпарат беретін модельдеу нәтижелері талқыланады. Жұмыстың соңында, атқарылған жұмыс қорытындыланып, болашақта жоспарланған зерттеулер туралы түсінік беріледі. Оңалтуға арналған робот манипуляторларының басқарудың қолданыстағы жүйелерімен зерттеу және жаңа шешімдерді іздеу, тобық буынын оңалтуға арналған қайта конфигурацияланатын параллель 3-RPS манипуляторының кинематикалық есептерін құру болып табылады.

Материалдар мен тәсілдер.

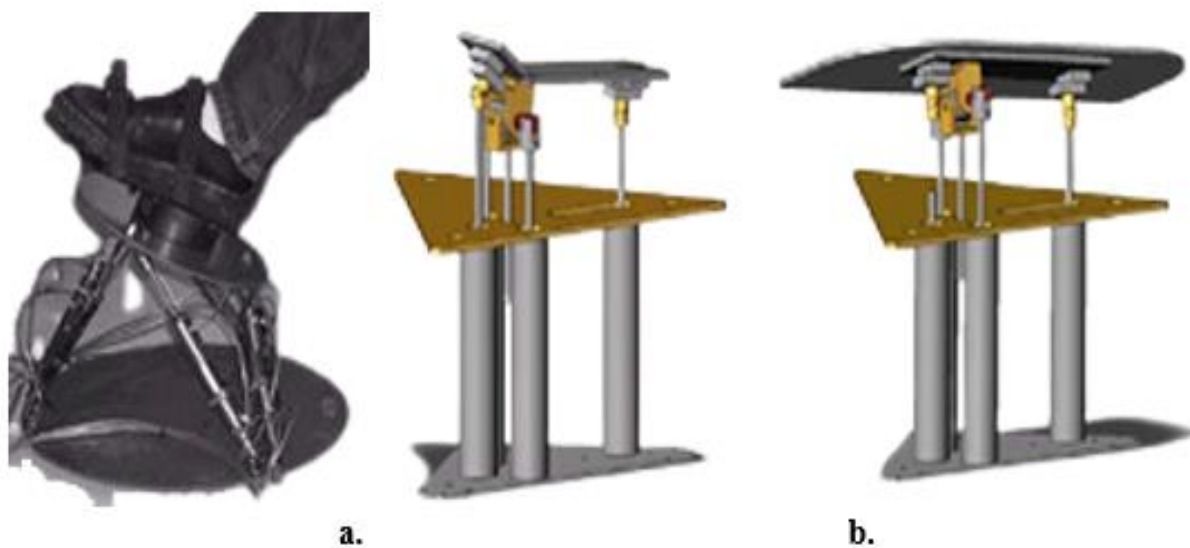
Адамның тобық буыны - бұл адам қаңқасының өте күрделі құрылымы және қозғалыс кезінде күштер мен моменттердің берілуінде маңызды рөл атқарады [1-4]. Тобық буынында жиі байқалатын зақымдану ол – буын байламдарының созылуы. Олар буын шектен тыс функционалды қозғалыс жасаған кезде пайда болады, мысалы спортшыларда, сонымен қатар пассивті қозғалыс жасайтын, яғни көбінесе отырықшы өмір салтын ұстанатын адамдарда да болуы мүмкін [5]. Төменгі аяқ әлсіздігі, яғни аяқтың басы мен саусақтарын жоғары қарай ие алмау тобық буындары зақымдануының (мүгедектігінің) тағы бір көрінісі болып табылады. Сондай-ақ, сүйектердің сынуы немесе инсульттен туындаған неврологиялық бұзылулар және омыртқа жарақаттары, паралич, гемипарез және т.б. сияқты басқа да ауыр аурулар тобық буынын оңалтуды әлдеқайда ұзақ мерзімді және күрделі процесс етеді. Тобық буынын қалпына келтіруде қолданылатын физиотерапиялық процедуралардың түрлері әртүрлі және науқастың бұлшық еттерінің немесе қаңқасының нақты жағдайына байланысты болады. Әдетте күшейту және резистивті жаттығулар ұсынылады. Пассивті жаттығулардың басқаларынан айырмашылығы жаттығуды орындау кезінде науқас ешқандай күш жұмсамайды. Оның

орнына физиотерапевт науқастарға аяқ бұлшық еттері мен буындарын қозғалтуға, жылжытуға көмектеседі. Көмекші жаттығу түрі – бұл пациент пен физиотерапевтің күш-жігерін біріктіретін аралық әдіс-тәсіл, яғни пассивті жаттығулар белсенді жаттығулармен қатар жүргізіледі. Белсенді жаттығуларда пациент өзі физикалық күш салады. Ал соңғы резистивті жаттығулар кезінде арнайы механикалық құрылғылардың көмегімен пациенттерге қарсы күш салынады, яғни пациент қозғалу барысында әлде бір кедергілерге тап болады.

Пациенттер кез-келген оңалту жұмысында сәтті нәтижеге қол жеткізуді сұрайтын басты талап-жаттығу бағдарламасын үзіліссіз қарқынды орындау. Мұндай бағдарламалардың жиілігі мен ұзақтығы науқастың жағдайына, оның жүру қабілетіне байланысты белгіленеді. Алайда, егер пациенттің уақыты болмаса немесе қаражат жағдайына байланысты бағдарламада шектеулі болса, оның қалпына келу мүмкіндігі төмендейді.

Оңалту робот - манипуляторды қолдану терапевттерге жүктемені азайтуға, жаттығу кезінде деректерді анықтауға және қалпына келтіруді бақыланатын және қайталанатын түрде анықтауға көмектеседі. Қалпына келтіруге арналған робот-манипулятор негізгі класы манипулятор болып табылатын төменгі аяқтарды қалпына келтіруге арналған роботтар адам денесімен қалай киілсе, солай байланысады және жаттығу кезінде барлық буындардың қозғалысын басқара алады.

Кең танымал параллель манипулятор 3-RPS (R, P, S сәйкесінше айналмалы, призмалық, сфералық ілмектерді білдіреді) RPS аяқтарының әртүрлі орналасуымен көптеген зерттеушілер кеңінен зерттеді. 1983 жылы [6] Хант параллельді негізі мен платформасы бар 3-RPS манипуляторын ұсынды. Стадльбауэр және т. б. [7] алгебралық тәсілдерді қолданды, осы манипулятордың тікелей кинематикасының он алты шешімін тізімдеу. [7] - де ұсынылған Schadlbauer және т. б. қолданды. 3-RPS параллель манипуляторына жататын екі жұмыс режимін сипаттау үшін. Өзгертілген 3-RPS параллель манипуляторы Gen және т. б. [8], онда манипуляторды 3-RPS текшесіне қайта конфигурациялауға болады. 3 параллель манипулятордың кинематикалық әрекеті-RPS Cube және т. б. талқыланды.



1 сурет – а) Rutgers Ankle арналған Робот платформасы б) Yun et al ұсынған Робот платформасының прототипі

Осындай роботты құрылғылардың пайда болуына 1965 жылы Гофф-Стюарт ойлап тапқан параллель платформалық роботтардың шығуы түрткі болды [7-8]. Осы санаттағы ең танымал алғашқы роботтардың бірі – Rutgers Ankle роботы болып табылады [8]. Ол пневматикалық поршендермен басқарылатын алты еркіндік дәрежесімен қозғалуға және қарсыласу жаттығуларына негізделген оңалту бағдарламасын жасауға мүмкіндік береді. Rutgers Ankle роботы терапевтке науқасты қашықтықтан басқаруға жол ашты, бұл инсульт және сіңірлердің созылуы сынды ауруларды емдеу үшін өте пайдалы болды. Бұл роботтар клиникалық тұрғыдан көп зерттелген және оларды біршама ғылыми әдебиеттерде кездестіруге болады [9]. Алайда, бұл механизм оңалту терапияларында көп қолданылмайды.

Rutgers Ankle роботы пайда болған сәттен бастап осы бағытта біршама ғылыми-зерттеу жұмыстары жарық көрді: 2004 жылы Дай және басқалары [10] тобық буынындағы сіңірлердің созылуын емдеуге арналған мобильділік пен қаттылық тұрғысынан бағаланатын орталық мобильді платформаны қоса алғанда, үш-төрт еркіндік дәрежесі бар 3-SPS+S типті робот прототипін ұсынылды. Селлер бір еркіндік дәрежесі бар және клиникалық сынақтардан өткен платформалық робот прототипіне тоқтады. Оның жұмыс принципі тобық буынының интеллектуалды созылуына негізделген, яғни ол қарсыласу моменті мен созылу жылдамдығында кері байланыс жасайды [11].

Юн және т.б. пневматикалық жетегі бар 2-PSPP+PRR типті платформалық робот көмегімен платформалар арасында салыстырмалы айналмалы және тура қозғалыстарды жасау мүмкіндігін зерттеді [11]. Сонымен қатар, платформалық роботтарды салыстырмалы түрде қайта конфигурациялау ұсынылды, ұзын платформа есебінен бұл роботтар тек созылу жаттығуларын ғана емес, сонымен қатар тепе-теңдік пен проприоцепция қозғалыстарын да жасауға мүмкіндік берді. Сирселудис және т.б. Ли Мен Шах ойлап тапқан 3-UPS платформалық робот құрылымын жақсартты [12] және екі осьті жіліншік-табан буыны қозғалысын имитациялау үшін қолданылды.

Соңғы жылдары жаңа қызықты робот архитектуралары пайда болды: Сунг және т.б. [13] табанның жоғары және төмен қарай иілуі кезінде қозғалыс көлемін реттеуге мүмкіндік беретін төрт серпімді өзекше көмегімен робот механизмін өзгертті. Ван және басқалары [14] 3-RUS/RRR типті үш еркіндік дәрежесі бар параллель робот дизайнын ұсынды. Олар буындардың айналу осын жасай алады және оңалту жаттығуларына байланысты екі еркіндік дәрежесі бар қозғалыстарды ажырата алу қабілеті бар. Chatamoog ұсынған Optiflex [15] роботы екі еркіндік дәрежеден тұрады, соған байланысты оның патенттелген дизайны табанның жоғары және төмен қарай иілуін және инверсиялық-эверсиялық қозғалыстарды жасауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, әдебиеттерде тобық буынын оңалтуға қажетті еркіндік дәреже алу үшін басқа да көптеген тиімді робот дизайндарын кездестіруге болады. Солардың бірі – аяқ қозғалысын оңалтуға арналған Agile Eye [12-15] 3-RRR параллель сфералық манипулятор роботы. Алайда, оның бір кемшілігі бар: құрылғыны жасау барысында айналу осьтерін сәйкестендіру қиындығы. Симновске және басқалары жақында Active Ankle қатты платформалық роботтарға балама робот прототиптерін жасап шығарды, олар көлемі бойынша ықшам болғандықтан, басқа да буындарға қолданыла береді [15].

Айтарлықтай кемшіліктер — жоғары қозғалу жылдамдығы, күш пен қозғалыс амплитудасының айтарлықтай артуы, реттеу және бағдарламалау мүмкіндігі жұмыстың үлкен көлемін орындауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау.

Аяқтың әртүрлі позициясы қарастырылған белгілі 3-RPS параллель манипуляторын (мұндағы R – айналмалы, P – призмалық және S сәйкесінше сфералық байламдарды білдіреді) осы уақытқа дейін көптеген зерттеушілер егжей-тегжейлі зерттеді. Тең жақты

платформадан тұратын 3-RPS параллель манипуляторын 1983 жылы Хант ұсынды. Сондай-ақ Стадлбауэр және басқалары аталған манипулятордың кинематикасы үшін он алты шешімді тұжырымдау үшін [13, 14, 15]-де сипатталған алгебралық жуықтауларды қолданды. Стадлбауэр және басқалары параллель 3-RPS манипуляторының екі жұмыс режимін сипаттау үшін [15] жұмыста сипатталған аксодті пайдаланды. [14] жұмыста Ган және басқалары модификацияланған параллель 3-RPS манипуляторын енгізді. Ол 3-RPS Cube манипулятор қызметін де атқара алады (3-RPS Cube параллель манипуляторының кинематикасы туралы ақпаратты [9, 10, 11] жұмыстардан табуға болады).

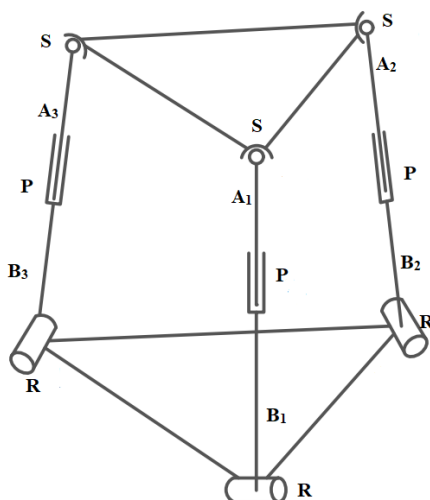
Калла және басқалар параллель 3-RPS манипуляторының $\Sigma 2$ сингулярлығын зерттеді [12]. Жылжымалы платформаны бекітілген платформаға өзгертсе параллель 3-RPS манипуляторы 3-SPR параллель манипуляторына айналады. Наяк және басқалары [13] жұмыста шеңбердің максималды радиусын (MICR) пайдалана отырып, осы аталған 3-RPS және 3-SPR манипуляторларының сингулярлықтан бос жұмыс кеңістігін салыстырды. Сонымен қатар параллель 3-PRS манипуляторының жұмыс режимдері мен сингулярлығын салыстыру мақсатында [14] жұмыста MICR қолданылды.

Әртүрлі жұмыс режимі бар параллель манипуляторлар өлшемдерін олардың сингулярлық қабілетімен бағалауға болады [15]. Зерттеушілер манипуляторлардың сыртқы жағдайларға қаншалықты жақсы бейімделе алатындығын бағалау үшін бірнеше тиімділік көрсеткіштерін ұсынды. Әдебиеттерде манипуляторлардың тиімділігінің бірнеше көрсеткіштері ұсынылды, мысалы, виртуалдылық коэффициенті [11-14], беріліс коэффициенті (TI) [13], толық беріліс коэффициенті (GTI) [8], шығыс беріліс коэффициенті (OTI) және жүктеме коэффициенті (CTI) [12], жұмыс кеңістігін бағдарлау коэффициенті (GTOW) [13], ауыспалы қозғалыс немесе күштің беріліс коэффициенті [14].

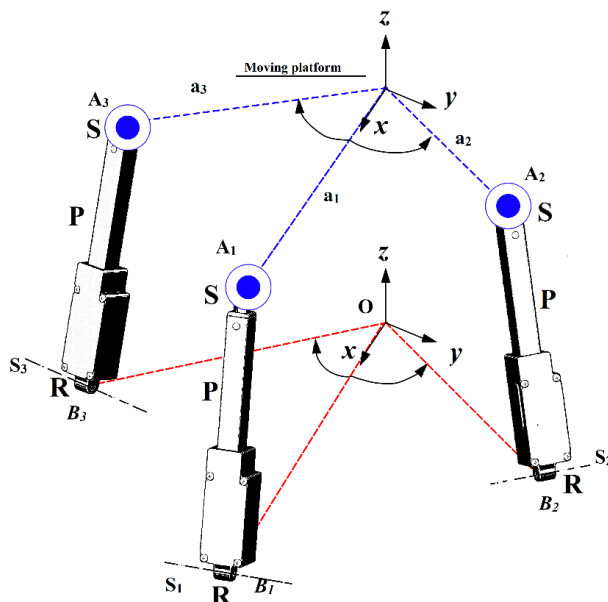
Тобық буынын қалпына келтіруге арналған 3-RPS манипуляторы — бұл пациенттерге жарақаттарын немесе операцияларын қалпына келтіруге көмектесетін роботты құрылғы. Құрылғы үш негізгі компоненттен тұрады: айналмалы топса, призмалық топса және сфералық топса. Бұл буындар тобықтың табиғи қозғалысын имитациялайтын қозғалыс ауқымын қамтамасыз ету үшін бірге жұмыс істейді, бұл пациенттерге буынды нығайтуға және қалпына келтіруге көмектесетін жаттығулар жасауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, құрылғы пациенттің үлгерімін бақылайтын және буындардың қозғалысын сәйкесінше реттейтін сенсорлар мен басқару жүйелерін қамтуы мүмкін.

Оның үш түрлі қозғалыс жазықтығында тобық буын қозғалысын орындау үшін бірге жұмыс істейтін үш сызықтық электр жетегі бар: сагиттальды (алдыңғыдан артқа), фронтальды (бүйірден) және көлденең (айналмалы) жазықтық. Манипуляторды тобықтағы ұтқырлықты, күш пен тұрақтылықты жақсартуға көмектесетін физиотерапиялық жаттығулар үшін пайдалануға болады.

Манипулятордың кинематикалық және динамикалық мінез-құлқын зерттеу нәтижелері оның басқару жүйесін әзірлеу және модельдеу үшін маңызды болып табылады. Жұмыста Ньютон-Эйлер және Лагранж-Эйлер әдістеріне негізделген манипулятордың қозғалыс теңдеулерін қолданатын манипуляторларды динамикалық модельдеудің әдісі ұсынылған. Осы әдісті қолдана отырып, 3 еркіндік дәрежесі бар 3-RPS манипуляторының қозғалыс динамикасының теңдеулері құрылды. Өзірленген әдіс берілген траектория бойынша қозғалысты қамтамасыз ететін манипулятор жетектерінің қажетті айналу моменттерінің мәндерін анықтау кезінде сыналды. Бұл әдісті берілген динамикалық параметрлердің орындалуын қамтамасыз ететін қатты сілтемелері бар манипуляторларды құру үшін пайдалануға болады.



2 сурет - RPS параллель манипуляторының кинематикалық сұлбасы



3 сурет - RPS параллель манипуляторының 3D дизайны

Ұсынылған 3-RPS параллель манипуляторының дизайны 2-3 суретте көрсетілген. Бұл манипуляторда үш RPS аяқ болады. Әрбір аяқ айналмалы, призмалық және сфералық буындардан тұрады. Үш айналмалы буынның осьтері A_i нүктеде қиылысады. Координата басы O нүктесінде орналасқан x, y, z координаталар жүйесі жылжымайтын жақтау ретінде Σ_0 анықталады. Манипулятор негізі үш айналмалы буындармен шектелген. i -ші айналмалы буын осы A_i нүктесі арқылы өтеді және оның бірлік векторы s_i ($i = 1, 2, 3$) деп белгіленеді. A_i нүктесі a_i және ε_i есептік параметрлеріне байланысты $z = 0$ жазықтығының кез келген жерінде орналасуы мүмкін. Мұндағы a_i O және A_i нүктелері арасындағы қашықтық, ал ε_i x осьі мен OA_i векторы арасындағы бұрыш. ε_i бұрышының синусы, косинусы және тангенсі келесідей жазылады: $s_{\varepsilon_i} = \sin(\varepsilon_i)$, $c_{\varepsilon_i} = \cos(\varepsilon_i)$ және $t_{\varepsilon_i} = \tan(\varepsilon_i)$.

Әрі қарай, біз A_i , мұндағы $i = 1, 2, 3$ нүктелерінің орналасу векторларын анықтау үшін проекциялық координаттарды қолданамыз. A_i нүктесі x осьінде орналасады деп

болжанады, сондықтан $\varepsilon_l = 0^\circ$, ал Σ_0 арқылы көрсетілген A_i нүктесінің координаттары мен s_i векторы келесідей өрнектеледі

$$r_{A_1}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad r_{A_2}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ c_{\varepsilon_2} & a_2 \\ s_{\varepsilon_2} & a_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad r_{A_3}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ c_{\varepsilon_3} & a_3 \\ s_{\varepsilon_3} & a_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad s_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -s_{\varepsilon_2} \\ c_{\varepsilon_2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad s_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -s_{\varepsilon_3} \\ c_{\varepsilon_3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Координата басы Q нүктесінде орналасқан u, v, w координаттар жүйесі Σ_l деп аталады және ол жылжымалы платформаға бекітілген. Үш сфералық буын жылжымалы платформаның жоғарғы жағында орналасқан. i -ші сфералық буынның орталығы B_i ($i = 1, 2, 3$) деп белгіленеді. B_i нүктелерінің орналасуы b_i және ε_i параметрлеріне байланысты $w = 0$ жазықтығында кез келген болуы мүмкін, мұндағы b_i - B_i және Q нүктелері арасындағы қашықтық. B_i нүктелерінің координаттары Σ_l түрінде келесідей өрнектеледі:

$$r_{B_1}^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad r_{B_2}^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ c_{\varepsilon_2} & b_2 \\ s_{\varepsilon_2} & b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad r_{B_3}^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ c_{\varepsilon_3} & b_3 \\ s_{\varepsilon_3} & b_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Сонымен құрастырылып отырған 3-RPS параллель манипуляторларын сегіз түрлі параметрмен сипаттауға болады, олар $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, \varepsilon_2, \varepsilon_3$.

3 суретте көрсетілген параллель 3-RPS манипуляторы тобық буынын оңалту құрылғысының CAD моделі. Параллель манипулятор тобық буынына киелетін болуы керек, сондықтан оның үш айналмалы буыннан тұратын негізі науқастың балтырына бекітіледі. Үш сфералық буынды қамтитын жылжымалы платформа науқастың табанында орналасады.

Аяқтың негізгі қозғалыстарына сәйкесінше сагиттальды, көлденең және фронтальды жазықтықтарда жүзеге асырылатын плантарфлексия - дорсифлексия, абдукция - аддукция және инверсия - эверсия сияқты қозғалыс түрлері жатады. Бұл қозғалыстардың өзара комбинациясы 3 еркіндік дәрежесі бар (3-DOF) қозғалыстарды жасауға мүмкіндік береді. Аяқ табаны эверсия және инверсия қозғалыстарын ешқашан дәл орындай алмайтындықтан, тобық буыны 3 түрлі бағытта айналмалы қозғалыстар жасай алмайды. Керісінше, табан тек үш жазықтықтағы (фронтальды, сагиттальды және көлденең) қозғалыстардан тұратын супинация мен пронацияны жасай алады.

Плантарфлексия мен дорсифлексия – бұл негізінен сагиттальды жазықтықта болатын тобық буынының негізгі қозғалыстардың бірі болып есептеледі. Бірнеше зерттеулер күнделікті өмірде плантарфлексия-дорсифлексия қозғалысының максималды диапазоны 30° болатынын анықтады. Ұсынылып отырған 3-RPS параллель манипуляторының позициялану (немесе бағдарлану) сипаттамасы олардың ең маңызды көрсеткіштері болып саналады және оның мәні негізінен 30° -тан жоғары болуы тиіс.

2 суретте көрсетілген тобық буынын оңалту құрылғысының дизайнын сипаттайтын сегіз негізгі параметр белгілі. Олар $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Бұл параметрлер бір-бірінен тәуелсіз емес және олардың арасындағы байланыс немесе қатынас жылжымалы платформаға қойылған шектеулерге байланысты анықталады.

Қорытындылай келе, тобық буынын оңалту үшін 3-PRS робот манипуляторын әзірлеу оңалтудың тиімділігі мен тиімділігін арттырудың үлкен перспективаларын көрсетеді. 3-PRS механизмі басқа манипуляторларға қарағанда артықшылықтарға ие, соның ішінде дәлдік және қозғалыс ауқымы жоғарылайды, бұл оны оңалтудың әлеуетті құралы етеді.

Болашақ зерттеулерде сенсорлар мен жетектерді, сондай-ақ бағдарламалық жасақтама мен алгоритмдерді қамтитын манипуляторды басқару жүйесі манипуляторды дәл басқаруға және тобық буынындағы әртүрлі қозғалыстарды орындауға мүмкіндік береді.

Қорытынды.

Бұл мақалада 3-RPS параллель манипуляторларын жобалау үшін шектеулерге негізделген бірнеше дизайн шарттары қарастырылды. Бұл шарттар манипулятор негізі мен жылжымалы платформаның параметрлері арасындағы байланысты сипаттайды. Солардың ішінде бір дизайн шартына сәйкес 3 еркіндік дәрежесі бар параллель 3-RPS манипуляторы жасақталды, ол тобық буынын оңалту құрылғысы ретінде пайдаланылды. Оңтайлы параметрлерді анықтау үшін кинематикалық оңтайландыру әдісі қолданылды. Алдымен жылжымалы платформаның мүмкіндіктерін ілгерлемелі және айналмалы қозғалыстар тұрғысынан зерттеу үшін бағдарлау жұмыс кеңістігін параметрлеу жүргізілді.

Манипулятордың болашақ бағыттары дизайн мен басқару жүйесін жақсартуды, сондай-ақ оның нақты әлемдегі тиімділігін бағалау үшін клиникалық сынақтарды қамтиды. Сәтті болса, 3-PRS робот манипуляторы пациенттер үшін тиімдірек шешім ұсына отырып, тобық буынын оңалтуға мүмкіндік бере алады. Тұтастай алғанда, 3-PRS робот манипуляторын әзірлеу оңалту саласындағы қызықты жетістік болып табылады және болашаққа үлкен үміт береді.

Бұл жұмыста робот манипуляторды пайдаланудың ұтымдылығын арттыру саласында зерттеулер жүргізеді, сонымен қатар аналогтардың кемшіліктерін ескере отырып, робот манипуляторды басқару жүйесі жасалынады.

Ғылыми жаңашылдық сипатталған жұмыстың мақсаты тобық буынын оңалтуға арналған қайта конфигурацияланатын параллель 3-RPS манипуляторының физикалық іс-қимылын ескере отырып әрекет ететін аяқты оңалтуға қолайлы дизайн мен басқару тұжырымдамасын зерттеу болып табылады.

Қаржыландыру. Бұл зерттеуді ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігі қаржыландырды, № AP14972221 гранты.

ӘДЕБИЕТТЕР

[1] Zhetenbayev, N.; Zhauyt, A.; Balbayev, G.; Shingissov, B. Robot device for ankle joint rehabilitation: A review. *Vibroengineering PROCEDIA* 2022, 41, 96–102.

[2] Mattacola, C.G.; Dwyer, M.K. Rehabilitation of the Ankle After Acute Sprain or Chronic Instability. *J. Athl. Train.* 2002, 37, 413–429.

[3] Wang, X.; Qiu, J.; Fong, D.T. The applications of wearable devices in the rehabilitation of ankle injuries: A systematic review and meta-analysis. *Med. Nov. Technol. Devices* 2023, 17, 100210.

[4] Wang, T.; Zhang, B.; Liu, C.; Liu, T.; Han, Y.; Wang, S.; Ferreira, J.P.; Dong, W.; Zhang, X. A Review on the Rehabilitation Exoskeletons for the Lower Limbs of the Elderly and the Disabled. *Electronics* 2022, 11, 388.

[5] Shi, B.; Chen, X.; Yue, Z.; Yin, S.; Weng, Q.; Zhang, X.; Wang, J.; Wen, W. Wearable Ankle Robots in Post-stroke Rehabilitation of Gait: A Systematic Review. *Front. Neurorobot.* 2019, 13, 63.

[6] Laribi, M.A.; Carbone, G.; Zegloul, S. On the Optimal Design of Cable Driven Parallel Robot with a Prescribed Workspace for Upper Limb Rehabilitation Tasks. *J. Bionic. Eng.* 2019, 16, 503–513.

[7] Gaddi, D.; Mosca, A.; Piatti, M.; Munegato, D.; Catalano, M.; Di Lorenzo, G.; Turati, M.; Zanchi, N.; Piscitelli, D.; Chui, K.; et al. Acute Ankle Sprain Management: An Umbrella Review of Systematic Reviews. *Front. Med.* 2022, 9, 868474.

[8] Dong, M.; Zhou, Y.; Li, J.; Rong, X.; Fan, W.; Zhou, X.; Kong, Y. State of the art in parallel ankle rehabilitation robot: A systematic review. *J. NeuroEng. Rehabil.* 2021, 18, 52.

[9] Gonçalves, R.S.; Rodrigues, L.A.O.; Humbert, R.; Carbone, G. Development of a Nonmotorized Mechanism for Ankle Rehabilitation. *Eng. Proc.* 2022, 24, 19.

[10] Gonçalves, R.S.; Soares, G.; Carvalho, J.C. Conceptual design of a rehabilitation device based on cam-follower and crank-rocker mechanisms hand actioned. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2019, 41, 277.

[11] Gonçalves, R.S.; Carvalho, J.C.M. Robot Modeling for Physical Rehabilitation. In *Service Robots and Robotics: Design and Application*; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2012; pp. 154–175.

[12] Gherman, B.; Birlescu, I.; Plitea, N.; Carbone, G.; Tarnita, D.; Pisla, D. On the singularity-free workspace of a parallel robot for lower-limb rehabilitation. *Proceedings of the Romanian Academy Series A–Mathematics Physics Technical Sciences. Inf. Sci.* 2019, 20, 383–391.

[13] Pisla, D.; Nadas, I.; Tucan, P.; Albert, S.; Carbone, G.; Antal, T.; Banica, A.; Gherman, B. Development of a Control System and Functional Validation of a Parallel Robot for Lower Limb Rehabilitation. *Actuators* 2021, 10, 277.

[14] Tucan, P.; Ulinici, I.; Pop, N.; Puskas, F.; Carbone, G.; Gherman, B.; Luchian, I.; Pisla, D. Ankle Rehabilitation of Stroke Survivors Using Kuka LBR Iiwa. In *New Trends in Medical and Service Robotics*; Rauter, G., Cattin, P.C., Zam, A., Riener, R., Carbone, G., Pisla, D., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2021; Volume 93.

[15] Carbone, G.; Gonçalves, R.S. Editorial: Robot-assisted rehabilitation for neurological disorders. *Front. Robot. AI* 2022, 9, 1014681.

Nursultan Zhetenbayev, master's degree, senior lecturer, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named G.Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, n.zhetenbaev@aes.kz

Algazy Zhauyt, PhD, associate professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named G.Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, ali84jauit@mail.ru

Gani Balbayev, PhD, associate professor, Academies of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, g.balbayev@alt.edu.kz

Kuanysh Alipbayev, PhD, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named G.Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, k.alipbayev@aes.kz

Beibit Shingissov, PhD, associate professor, Academies of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, b.shingissov@alt.edu.kz

DEVELOPMENT OF A 3-PRS ROBOTIC MANIPULATOR FOR ANKLE JOINT REHABILITATION

Abstract. The importance of the article lies in the development of a new 3-PRS robotic manipulator for the rehabilitation of the ankle joint, which is a noteworthy scientific achievement

in the field of rehabilitation robotics. A robotic device for ankle joint rehabilitation, the 3-PRS mechanism provides precision and control of movements in the ankle joint, which makes it a unique and innovative tool for rehabilitation purposes.

The article also shows the potential of the robot 3-PRS manipulator to promote broader research in the field of robotics, its unique design and control mechanisms, as well as the kinematic optimization method for determining optimal parameters.

The scientific novelty of the article concerns the development of a new robotic manipulator that uses the 3-PRS mechanism and personalized feedback mechanisms to improve the results of ankle rehabilitation, as well as its potential to participate in a broader field of research in the field of robotics.

Keywords. Parallel robot, parallel manipulators, rehabilitation robot, ankle joint, 3-RPS.

Нурсултан Жетенбаев, магистр, старший преподаватель, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, nursultan.zhetenbaev@mail.ru

Алғазы Жауыт, PhD, ассоциированный профессор, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, ali84jauit@mail.ru

Гани Балбаев PhD, ассоциированный профессор, Академии логистики и транспорта, Алматы, Казахстан, g.balbayev@alt.edu.kz

Куаныш Алипбаев, PhD, Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, k.alipbayev@aes.kz

Бейбит Шингисов, PhD, ассоциированный профессор, Академии логистики и транспорта, Алматы, Казахстан, b.shingisov@alt.edu.kz

РАЗРАБОТКА РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА 3-PRS ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ГОЛЕНОСТОПНОГО СУСТАВА

Аннотация. Важность статьи заключается в разработке нового робота-манипулятора 3-PRS для реабилитации голеностопного сустава, что является заслуживающим внимания научным достижением в области реабилитационной робототехники. Роботизированное устройство для реабилитации голеностопного сустава, механизм 3-PRS обеспечивает точность и контроль движений в голеностопном суставе, что делает его уникальным и инновационным инструментом для целей реабилитации.

В статье также показан потенциал робота 3-PRS манипулятор для продвижения более широких исследований в области робототехники, его уникальной конструкции и механизмов управления, а также метода кинематической оптимизации для определения оптимальных параметров.

Научная новизна статьи касается разработки нового робота-манипулятора, который использует механизм 3-PRS и персонализированные механизмы обратной связи для улучшения результатов реабилитации голеностопного сустава, а также его потенциала для участия в более широкой области исследований в области робототехники.

Ключевые слова. Параллельный робот, параллельные манипуляторы, реабилитационный робот, голеностопный сустав, 3-RPS.
