

Н.Т.Жетенбаев¹, А.М.Дуйсебаева², Г.К. Балбаев³, Б.Т. Шингисов³, Д.О. Сейсенова¹

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

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

³ Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан
E-mail: nursultan.zhetenbaev@mail.ru

ОҢАЛТУҒА АРНАЛҒАН ПАРАЛЛЕЛЬ РОБОТ МАНИПУЛЯТОРЛАРДЫҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ

Аңдатпа. Бұл мақалада пневматикалық және электр жетегі бар параллель робот манипулятор түрлері егжей-тегжейлі сипатталған, және атқарушы механизмдердің конфигурациялары, траекторияны бақылаудың әртүрлі әдістері мен оңалту әдістерін ескере отырып зерттелген. Қарастырылған параллель робот манипуляторлар арасындағы айырмашылықтар мен ұқсастықтарды салыстыру, талдау және жалпылау арқылы механикалық дизайн мен интерактивті басқару стратегияларын жақсарту үшін одан да көп жұмыс істеу керек екенін көрсетеді. Бұл мақала болашақ көмекші роботтарды әзірлеушілер үшін пайдалы ресурс болады және осы саланың ары қарай дамуына ықпал етеді деп үміттенеміз.

Түйінді сөздер. Параллель робот манипулятор, тобық буынын оңалтуға арналған манипулятор, медициналық құрылғы, жетек түрлері, сызықтық электр жетегі, пневматикалық жетегі.

Кіріспе.

Тобық пен табан тепе-теңдікті ұстап тұру, тірек қызметі, және аяқтың қозғалысын жасау секілді бірқатар функцияларды атқарады. Алайда, ол әсіресе тірек-қимыл аппараты мен неврологиялық жарақаттарға, әсіресе инсульттан кейін жүруден бас тарту сияқты неврологиялық жарақаттарға бейім. Американдық «Жүрек» қауымдастығының мәліметтері бойынша, жыл сайын АҚШ-та шамамен 795 000 адам инсульт алады [2]; инсульттың арты жаман жағдайларға әкеліп соқтырады және бүкіл әлемде тұрақты мүгедектіктің жетекші себебі болып табылады. 15 миллионнан астам жаңа жағдай және инсульттан аман қалған 50 миллион адам жыл сайын тіркеліп отырады [3]. Тобықтың дисфункциясының маңызды факторы – орталық жүйке жүйесінің зақымдануы. Қозғалыс функциясын қалпына келтіру үшін жүйке жүйені белсендіру қажет [4]. Сондықтан физиотерапия осындай жағдайға тап болған пациенттер үшін өте қажет [5].

Физиотерапиялық ем-шара пациенттерге шектеулі қозғалыс ауқымын (ROM) қалыпқа келтіруге, әлсіз бұлшықеттерді күшейтуге, динамикалық тепе-теңдікті қалыпқа келтіруге және осылайша қозғалыс функцияларын біртіндеп қайтаруға септігін тигізеді [6]. Алайда, бұл ұзақ қайталанатын және қарқынды қалпына келтіру процесін қажет етеді. Бұл үлкен жүктемеге әкеледі. Бұл жағдай тобық буынын қалпына келтірудің дәстүрлі жаттығуларының айтарлықтай жүктелуіне алып келеді. Оларды физиотерапевттер зақымдалған орталық жүйке жүйесін біртіндеп ынталандыру және қалпына келтіру үшін жеке-жеке жүзеге асырады [7]. Дәстүрлі оңалту жаттығулары шектеулі уақыт пен ресурстарға байланысты жаттығулардың жеткілікті қарқындылығы мен жылдамдығын қамтамасыз ете алмайды. Сонымен қатар, оңалту жаттығуларының жоспары терапевтердің жеке клиникалық тәжірибесі негізінде жасалады. Бұл мынадай мәселеге әкеледі: терапевттер оңалту жаттығуларының формалары мен параметрлерін нақты

бақылай алмайды. Сондықтан зардап шеккен аяқ-қолдардың сапалы жаттығуын қамтамасыз ету қиын. Сондықтан тобық буынын қалыпқа келтіруге арналған дәстүрлі жаттығуларды арнайы роботтарды жасаумен алмастыру өте маңызды. Бұл роботтардың артықшылығы – ұзақ мерзімді, дәл және біркелкі емдеуді қамтамасыз ету. Сондай-ақ, бұл роботтар оңалту жаттығуларының күрделілігін нақты уақыттағы кері байланыстарға сәйкес бейімдей алады [8]. Сонымен қатар, тобық буынын оңалтудың роботты әдістерін қолдану бүкіл жаттығу процесінде нақты уақыт режимінде науқас жайлы деректерді жинауға мүмкіндік береді. Осылайша жаттығулардың тиімділігін бағалауға [9], сонымен қатар тобық буын кешенінің биомеханикалық қасиеттерін [10] анықтауға, және соның негізінде реабилитациялық жаттығуларды бейімдеуге болады [11]. Атап айтқанда, бұл технологиялар медицина қызметкерлерінің еңбек шығындарын тиімді төмендетіп, тобық буынын оңалту жаттығуларының тиімділігін арттырып, оңалту медициналық ресурстарының тапшылығын толтыра алады.

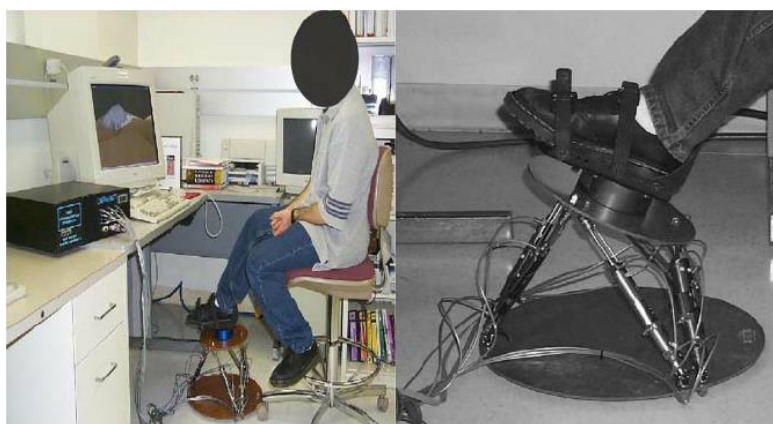
Оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар аяққа киілетін робот модельдері кең зерттелген технологиялар қатарына жатады.

Оңалтуға арналған параллель робот манипулятор модельдері фиксацияланған платформадан тұрады жабдықталған және олардың салмағының аз болуы және жеткілікті қаттылығы бірнеше еркіндік дәрежесі бар (DOF) көпжақты оңалту процедураларын жасауға мүмкіндік береді. Аяққа киілетін роботтар электрлік қуатпен жұмыс істейтін экзоскелеттер немесе ортоздар түрінде белгілі. Олар әдетте жүрісті қалыпқа келтіру үшін қолданылады. Оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар киілетін роботтармен салыстырғанда артықшылығы – аяқ фиксацияланған. Ол тобық буынының екінші рет жарақаттанудан сақтайды.

Тобық буынын қалпына келтіруге арналған роботты құрылғыларға әртүрлі зерттеулер жүргізілген. Солардың ішінде [12-17] жұмыстарда тобық буынын қалыпқа келтіруге арналған параллель робот манипулятор аяққа киілетін роботтардың механикалық дизайнына назар аударылды. [14] жұмыста киілетін роботтарды да қолдана отырып, тобық буынын қалыпқа келтірудегі роботты терапияның тиімділігі қарастырылды. Сондай-ақ, олар киілетін роботтар жаяу жүру дағдыларын үйретуге, ал оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар тобық буынын жаттықтыруға жақсы сәйкес келеді деген қорытындыға келді. Оңалтуға арналған параллель робот манипуляторларының дамуына қатысты жүйелі және жан-жақты зерттеулер әлі күнге дейін жоқ. Оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар саласындағы зерттеулердің өсуімен құрылғылардың әртүрлі конфигурациялары, жетек түрлері және оңалту жаттығуларының жаңа әдістері ұсынылды. Бұл осы салада жұмыс істеп бастаған зерттеушілер үшін қиындық тудыруы мүмкін.

Бұл жұмыстың мақсаты қазіргі заманғы оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар технологияларын жүйелі түрде зерттеу болып табылады. Сондай-ақ, жұмыс механизмдерінің конфигурациясы, жетектердің түрлері және оңалту жаттығуларының әдістері қарастырылады. Бұл оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар жобалайтын немесе басқаратын инженерлерге әртүрлі механикалық жүйелер мен басқару жүйелерінің артықшылықтары мен шектеулерін бағалауға мүмкіндік. Зерттеу тұрғысынан бұл жұмыста зерттеу саласын кеңейту және зерттеудің болашақ бағыттарына шолу жасау ұсынылады. Келесі бөлімдерде оңалтуға арналған параллель робот манипулятор құрылғысының жұмыс механизмдерінің конфигурациясына, траекторияны бақылауды басқарудың әртүрлі әдістері бар жетектердің түрлеріне және оңалту тренингінің әдістеріне шолу жасалады. Сонымен қатар оларды салыстыру, талдау және жалпылау жүргізіледі. Соңында, өте қызықты және тенденциясы жоғары зерттеулер талқыланады және осы шолулардың нәтижесінде оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар роботтарына қатысты

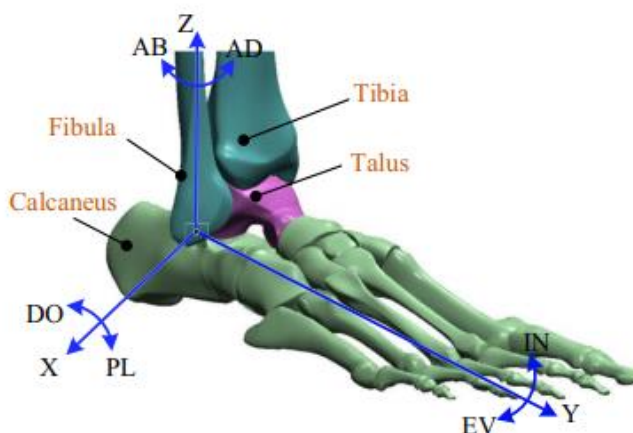
тұжырымдамалар ұсынылады. Алғашқы оңалтуға арналған параллель робот манипулятор 1999 жылы жасалып, «Rutgers Ankle» деп аталды [18].



1 сурет – Оңалтуға арналған параллель робот манипулятор «Rutgers Ankle»

Инсульттен аман қалғандар санының өсуімен, соңғы онжылдықта оңалтуға арналған параллель робот манипулятор бойынша зерттеулер өте өзекті болғанын көрсетеді. Зерттеу кезінде көптеген жұмыс механизмдерінің әртүрлі конфигурацияларын қолдана отырып, кейбір DOF-те тобық буынын қалыпқа келтіру жаттығуларын параллель робот манипуляторлар жүзеге асыра алатындығы белгілі болды. Оңалтуға арналған параллель робот манипулятор жұмысын бірқалыпты басқару үшін траекторияны бақылау әдісі қолданылатын басқару жүйесі қолданылды. Осы негізде оңалту тренингінің түрлі әдістері іске асырылды. Олар қауіпсіздік пен жайлылықты жақсарту үшін кейбір жетілдірілген басқару алгоритмдерімен біріктірілді. Таңдап алынған жұмыстар оңалтуға арналған параллель робот манипулятордың жұмыс механизмдерінің конфигурациясы, траекторияны бақылауды басқарудың әртүрлі әдістері бар жетек түрлері, сондай-ақ оңалту жаттығулары бойынша жалпыланды.

Адамның тобық буынының кешені негізінен 2 – суретте көрсетілгендей, тибиядан, фибуладан, талустан және өкше сүйегінен тұрады. Тибия мен фибула сүйектері тұтасып, тобық буыны кешеніндегі қозғалысты оңтайландырады [19].



2 сурет – Тобық буынның бұлшықеті және қаңқа анатомиясы, еркіндік дәрежесі

2 – суретте көрсетілгендей, тобық буын кешені 3-DOF-те қозғалыстар жасай алады, атап айтқанда: дорсифлекция/плантарфекция (DO/PL), инверсия/эверсия (IN/EV) және

аддукция/абдукция (AD/AB). [19] жұмыста Зиглер жүргізген *in vitro* зерттеуінде алынған осы бағыттар бойынша қозғалыстың шекті мәндерінің деректері келтірілген. Сонымен, оңалтуға арналған параллель робот манипулятордың механикалық дизайны 3-DOF және ROM-ды мүмкіндігінше қанағаттандыруы керек.

Материалдар мен тәсілдер.

Жүйелік талдау - бұл жүйенің айнымалылары немесе элементтері арасындағы құрылымдық байланыстарды орнату бойынша әрекеттер тізбегі болып табылатын танымның ғылыми әдісі. Жалпы ғылыми, эксперименттік, жаратылыстану, статистикалық, математикалық әдістер кешеніне сүйенеді.

Оңалтуға арналған параллель робот манипуляторларына талдау мен зерттеу жүргізу барысында робот манипуляторларының негізгі объектілері және олардың арасындағы өзара байланыс айқындалды, робот манипуляторларының басқарудың жетек түрлері яғни, сызықтық электр жетегі, пневматикалық жетегі. қарастырылды.

Нәтижелер мен талқылау.

1 жұмыс механизмдерінің конфигурациялары.

Тобық буыны кешенінің жұмыс ауқымын кеңейту үшін оңалтуға арналған параллель робот манипулятор механизмдерінің әртүрлі конфигурациялары жасалды. Мысалы, Stewart платформасын қолдануға негізделген 3a суретте көрсетілген Rutgers Ankle моделі [18] және оның модификациялары [20]; 3b суретте көрсетілген 4 еркіндік дәрежесі бар (4-DOF) басқарылатын параллель робот манипулятор. Соңғысы әрбір платформаның ілгерлемелі, айналмалы қозғалысын, (1T - 3R) сонымен қатар бойлық қозғалысын және де екі платформаның бірдей ілгерлемелі қозғалысын жасай алады (2T - 2R) [21]. Мұндағы T - жылжу, ал R-айналу [22]. 3d суретте үш еркіндік дәрежесі бар (3-DOF) 3-RSS/S параллель механизм көрсетілген, мұндағы R айналмалы буынды білдіреді [24]. ARBOT деп аталатын қосымша жетекпен жабдықталған, 2 еркіндік дәрежесі бар 3UPS/U параллель механизмі 3e суретте көрсетілген [25, 26]. Мұндағы U әмбебап буын бөлігін білдіреді, ал асты сызылған әріп жетекпен басқарылатын буын бөлігін білдіреді [27, 28]. 3f суретте PK Ankle деп аталатын бейімделген сфералық Gosselin роботы көрсетілген [86]. 3g [55], 3h [29, 30], 3i [52] суреттерінде тобық буынын оңалтуға арналған басқа да параллель механизмдер көрсетілген. Жоғарыда аталған барлық робот манипуляторлар параллель механизмнің артықшылықтарына ие. Артықшылықтары сонымен қатар бір роботтарға қарағанда төмен инерция, жоғары қаттылық, ықшамдылық, үлкен портативтілік және дәл ажыратымдылықты қамтиды. Олардың тағы бір ортақ ерекшелігі бар. Олардың қозғалтқыштары тірек платформасының астында орналасқан. Бұл дегеніміз, құрылғының айналу осы тобық буыны кешенінің айналу осынен алыс орналасқан. Бұл дизайн мен басқаруды айтарлықтай жеңілдетеді, бірақ пациенттер үшін күтпеген қозғалыстар тудыруы мүмкін. Мысалы, транслокациялардан туындаған айналу, бұл төменгі аяғы өздігінен қозғала алмайтын пациенттің жағдайын едәуір нашарлатады. Бұл оңалту процесінде тобық буыны кешенінің біркелкі емес кездейсоқ күштерге ұшырауына әкелуі мүмкін, соның нәтижесінде ол екінші рет аяқтың зақымдалуына әкеліп соқтыруы мүмкін. Екінші жағынан, пациент мұндай роботты механизмдерді пайдалану кезінде тобық буынын қозғалысыз немесе толығымен босаңсытып ұстап тұра алады. Пациент сонымен қатар оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар айналу орталығын тобық буыны кешенінің айналу осымен сәйкестендіре алады, бұл белгілі бір дәрежеде тобық буынының екінші реттік зақымдануын болдырмайды.

Осы себепті пневматикалық және электрлік қозғалтқыштары бар көптеген оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар түрлері жасалды. Мысалы, 3j суретте көрсетілгендей жұмсақ параллель механизмі және 3 еркіндік дәрежесі бар (3-DOF) пневматикалық робот [31]; 3k суретте көрсетілген 3 еркіндік дәрежесі бар (3-DOF) пневматикалық оңалтуға арналған параллель робот манипулятор [32, 33]; 3m суретте көрсетілген 3 еркіндік дәрежесі бар (3-DOF) электр жетекті резервті роботы; 3n суретте көрсетілген параллель механизмді резервтік 3 еркіндік дәрежесі бар электржетекті 3-RUS/RRR роботы [37, 38]. Соңғысын 2 еркіндік дәрежесі бар 3-RUS/U резервтік механизмге айналдыруға болады, ол кезде аяқты қоршап тұрған резервтік жетек істен шығарылады [39]. Сонымен қатар оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлардың келесідей түрлері бар: 3o суретте көрсетілген 3 еркіндік дәрежесі бар 3-PRS жіліншік табан буынын оңалту манипуляторы [40-42]; және де 3 еркіндік дәрежесі бар 4p суретте көрсетілген 2-UPS/RRR роботы [43-46]. Барлық аталған оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлар үшін пневматикалық жетек жиі қолданылатын қозғалтқыш пневматикалық бұлшықет (PMA) болып табылады. Оның артықшылығы - аз салмағында және жоғары қуат пен көлем қатынасында. Осылайша тобық буынымен сәйкестендіру үшін ол қосымша жұмсақтықты қамтамасыз ете алады [47, 70]. Алайда, PMA тек тарту-созу принципінде жұмыс жасай алады, ілгерлемелі қозғалыстарға қатыспайды, сондықтан бұл мәселе механизмнің күрделенуіне әкеліп соқтырады, өйткені оңалтуға арналған параллель робот манипуляторларда DOF қозғалысына жету үшін $(n + 1)$ қозғалтқыш қажет. Керісінше, алға және кері бағытта айналмалы қозғалыстарды орындау үшін басқаруға болатын электрқозғалтқышын пайдаланған ыңғайлы. Бұл электр жетегі бар параллель робот манипуляторлар үшін резервтік жетектің қажеті жоқ дегенді білдіреді. Сонымен қатар, олар өлшемдерінің кіші болуына қарамастан пневматикалық жетегі бар параллель робот манипуляторлар сияқты функцияларды орындай алады. Алайда, параллель робот манипуляторлардың электр жетегімен сәйкестендірілуі басқару алгоритмдерімен жүзеге асырылады [27, 60-62]. Сонымен қатар, көптеген параллель робот манипуляторлар күштерді біркелкі бөлу үшін, кемшіліктерді жою және функционалдылықты жақсарту үшін резервтік қозғалтқыштармен жабдықталады, мысалы ARBOT [28] және 3-RUS/RRR. Алайда, бұл механизмнің күрделенуіне, тармақталған тізбектің пайда болуына әкеледі, сондықтан оны басқару қиындай түседі.

Траекторияны бақылауды басқарудың әртүрлі әдістері бар жетектердің түрлері.

Жоғарыда айтылғандай, жетек түріне негізделген оңалтуға арналған параллель робот манипуляторлардың екі түрі бар, атап айтқанда пневматикалық және электр жетекті.

PMA-ның ерекше сипаттамалары бар: жеңіл салмақ, жоғары қуат пен көлем қатынасы және табиғи буынға ұқсас жұмсақтық [47]. Қалған параллель робот манипулятор түрлері электр жетегінің негізінде жұмыс істейді. Науқасқа ROM-ды қайта қалыпқа келтіру жаттығуларын жасау үшін параллель робот манипулятор тобық буыны кешенін іске қосу керек. Іске қосу алдын-ала анықталған траектория бойынша жүзеге асырылады. Бұл траекторияны бақылау үшін роботтың кинематикалық байланыстары жақсы басқару сипаттамаларына ие болуы керек дегенді білдіреді. Әсіресе бұл пневматикалық жетегі бар параллель робот манипулятор үшін өте маңызды. Джамвал және т.б. PMA-ның сызықтық емес және уақыт бойынша өзгеретін сипаттамаларын талдау үшін пневматикалық бұлшықеттің оңтайлы динамикалық моделін бұлшықеттің әрекетін дәл болжау үшін жасады [48]. Осы модельге негізделіп PMA сипаттамаларының сызықтық емес мәселесін шешу үшін қозуларды тіркейтін FBDO контроллері ұсынылды.

Сонымен қатар, параллель робот манипулятор жүйесінің оңтайлы траекториясы тобық буыны оңалту жаттығуларының анағұрлым қолайлы траектория құруға көмектесу үшін бірлескен байланыстар мен байламдар мен бұлшықет сіңірлерінің кернеуін минимизациялау арқылы есептелді [50]. CARR платформа ретінде қолдана отырып, Менг және т.б. қалыпқа келтірілген кері байланысты орнатудың NIFT сенімді әдісін ұсынды. Жүктеме коэффициентінің оңтайлы мәнін анықтау және жаттығу әдісін қолдану арқылы контроллердің сенімділігі және оның оңтайлы параметрлері анықталады [51]. Сол сияқты, Ай және т.б. пневматикалық бұлшықеттердің сызықтық емес сипаттамалары мәселесін шешу және робот-адамды оңалту процесінде қауіп факторларын жою үшін ABS-SMC кері сырғу режимінде басқарудың адаптивті әдісін жасады. Контроллердің сенімділігін тексеру үшін бес сау адам тартылды; максималды қателік, орташа қателік және орташа квадраттық ауытқу (RMSD) сәйкесінше 7,05%, 2,15% және 0,780 болды [52]. [53] зерттеу тобы сонымен қатар модельденбейтін кедергілердің мәселесін шешу үшін кірістері мен шығыстары (MIMO-DCSMC) қозуарға қатысты компенсацияланған сырғымалы режим контроллерін жасады. Сонымен қатар, Чжан және т.б. CARR траекториясын бақылау дәлдігін жоғарылату үшін каскадты контроллер әзірледі. Олар сыртқы шлейфтегі жағдайды бақылау және ішкі шлейфтегі пневматикалық бұлшықеттердің күшін бақылауға арналған контроллерлер жиынтығынан тұрады. Бұл жағдайда траекторияны бақылау кезінде нормаланған орташа квадраттық ауытқу (NRMSD) 2,3%-дан аз болуы мүмкін [54].

Жоғарыда келтірілген шолудан пневматикалық параллель робот манипулятордың көпшілігі оңалту процесінің эффективтілігін жақсарту үшін траекторияны бақылауды басқару алгоритімімен жасалғанын байқауға болады [48, 49, 51, 52, 54]. Себебі PMA сызықты емес болғандықтан ол модельдеуді қажет етеді [54]. Алайда, PMA-ны дәл басқару олардың сызықты емес және уақыт өте келе өзгеретін сипаттамаларына байланысты күрделі мәселе болып табылады. Атап айтқанда, оларды сызықты емес үйкеліс, сызықты емес серпімділік және сызықты емес созылу күштерінің қосындысы ретінде модельдеуге болады. Осы компоненттермен байланысты коэффициенттерді дәл анықтау қиын, өйткені олар пайдалану барысында үздіксіз өзгереді [73]. Сондықтан траекторияны бақылай отырып басқару алгоритмі пневматикалық параллель робот манипулятор үшін өте маңызды болып табылады. [49, 51, 52, 54] Сызықтық емес PMA сипаттамалары мәселесін шешу үшін келесі технологиялар жасалды: FBDO, NIFT, ABS-SMC және траекторияны бақылап отыратын адаптивті басқару технологиясы. Керісінше, электр жетегі бар параллель робот манипулятор үшін траекторияны бақылауды басқару қажет емес, себебі барлық кинематикалық байланыстарды сервомотор басқарады. Электр жетегі бар параллель робот манипулятор позиция реттегіші негізінде траекторияны бақылаудың жоғары дәлдігіне қол жеткізе алады [24, 28, 35, 60]. Электр жетегі бар параллель робот манипуляторда қолданылатын жалғыз траекторияны бақылау алгоритмі [55] жұмыста сипатталған. Ол PID (FOPID) және қосылатын қайталанатын контроллерлерін пайдаланады [56]. Бұл адам мен роботтың өзара әрекеттесуі кезінде сыртқы қоздырғыштарға қарсы тұру және тобық буынын қалыпқа келтіру жаттығулары кезінде жанама әсерлерді азайту үшін жасалады.

Оңалту жаттығуларының әдістері.

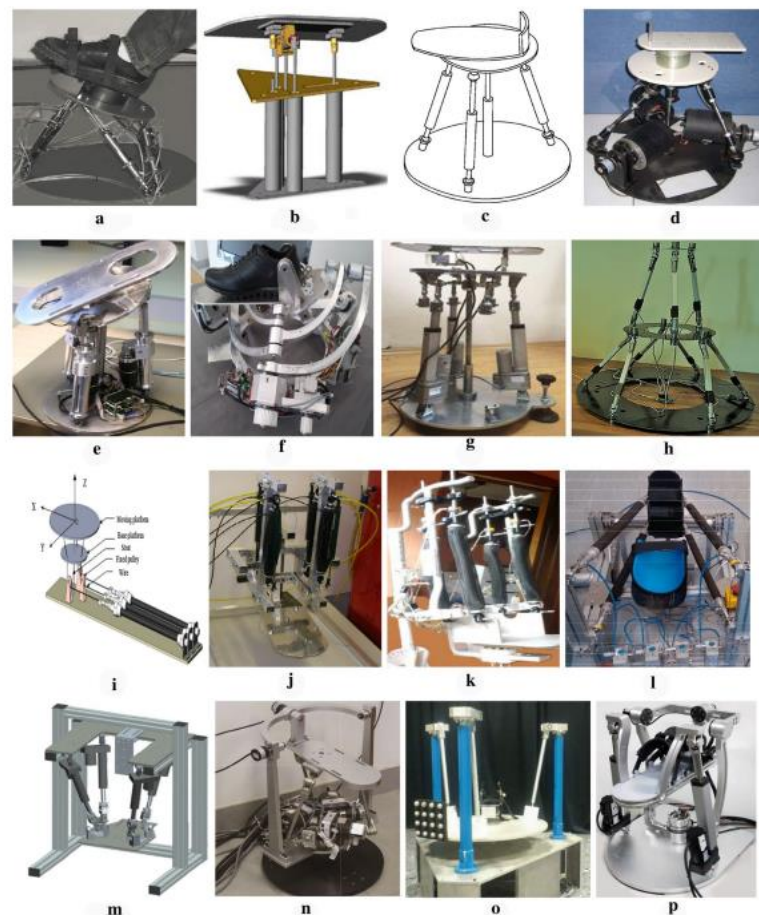
Автоматтандырылған оңалту жүйелерінің басты артықшылығы - бірқатар жаттығуларды қайталап орындау мүмкіндігі, бұл жүйке-бұлшықет жарақаттарын емдеуде ерекше пайдасын әкелетіндігі дәлелденген [57]. Сондықтан әртүрлі басқару әдістеріне негізделген және әртүрлі параллель робот манипулятор көмегімен жасалған оңалту жаттығулардың маңызы өте жоғары. Саглие және басқалары ARBOT құрылғысы үшін 1

кестеде көрсетілгендей басқару схемасын жасады. Ол әдеттегі оңалту бағдарламалары ұсынатын активті және пассивті жаттығуларды басқару алгоритмдерімен қамтамасыз етті [28, 60]. Бұл тобық буынын оңалтуда ең көп қолданылатын әдістердің бірі. Тобық буынын қалыпқа келтіру процесі негізінен ROM шамасын жақсарту, бұлшықет күшін тудыру және проприоцептивті қабылдау қабілетті жақсарту сияқты іс-шараларды қамтиды. Олардың ішінде ROM жаттығуы барлық параллель робот манипулятордың негізгі функциясы болып табылады және әдетте траекторияны бақылау әдістерін қолдану арқылы жүзеге асырылады. Осы кезде тобық буынының кешені физиотерапияның ерте сатысында айналма қозғалыстармен алдын-ала анықталған траектория бойымен қозғалады, бұл пациенттерге шектеулі ROM шамасын қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Аяқтың бұлшықетін жаттықтыру үшін изометриялық жаттығулар, изотоникалық жаттығулар немесе изокинетикалық жаттығулар сияқты активті жаттығулар қолданылады. Пациент өзінің ROM шамасын белгілі бір бұлшықет күшімен қалыпқа келтіргеннен кейін оңалту процесінің соңғы кезеңінде проприоцептивті жаттығу жасалынады. Жаттығудың бұл түрі тепе-теңдікті сақтауға арналған жаттығулармен сипатталады. Бұл жағдайда пациент тобық буынын қалыпқа келтіру үшін роботта тұрып, шайқалып тұрған ағаштың үстінде тұрғандай тепе-теңдікті сақтауға тырысуы керек.

Электр жетегі бар параллель робот манипулятор үшін Юн және т.б. пассивті жаттығулардан бастап проприоцептивті жаттығуларға дейін оңалту процесін жақсартуға арналған жаттығулардың кең жиынтығын ұсынды [59]. ARBOT пациент үшін пассивті жаттығуларды орындау үшін позицияны басқару схемасы және пациент үшін активті жаттығуларды орындау үшін импедансты басқару арқылы арнайы жасалған сызықтық серво жетектерімен жұмыс істейтін етіп жасалған. Алайда, ол пассивті жаттығулардың үйлесімділігін басқаруды ескермейді; тек көмекші басқару эксперименталды түрде зерттеліп бағаланды, ал басқа басқару схемалары тек талданды және модельденді [27, 60]. Жүйенің қауіпсіздігін және эффективті оңалту процесін қамтамасыз ету үшін резервтік жетегі және 3 еркіндік дәрежесі (DOF) бар параллель робот манипулятор үшін Цой және басқалары робот пен адамның тобық буынының компьютерлік модельдерін ескере отырып, компьютерлік модельдеуді қолдана отырып, айнымалы кедергісі бар контроллер жасады. Тобық буынында туындайтын кедергіге пропорционалды өзгертін манипулятор роботының кедергісі тұрақты кедергімен басқаратын роботтардың модельдеріне қарағанда құрылғының өнімділігі жағынан үлкен артықшылық береді [61, 62]. Осы негізде [63] жұмыста параллель робот манипулятордың әртүрлі DOF мәндері арасындағы байланысты ескеретін күшке негізделген қарсылық реттегіші ұсынылды. Ол робот манипулятордың якобианы мен инерция матрицасы арасындағы байланысы туралы мәліметтерді қолданады [64]. Алайда, оңалту роботтары оңалту процесі басында пациенттің табанына күтпеген асқын жүктеме түсуі секілді мәселелерге ұшырап жатады [37]. 2-UPS/RRR PARR үшін пассивті қалпына келтіру жаттығуларының траекториялары [65, 66] жұмыстарда ұсынылған басқару жүйесінің көмегімен орнатылды. Ол жаттығу қауіпсіздігін арттыру үшін пациенттің бұлшықет күшінің деңгейін толығымен ескереді. Жаттығулардың қауіпсіздігін арттыру үшін және оның туындыларын бақылауға негізделген оңалту жаттығуларының үш схемасы жасалды, атап айтқанда: пациентке арналған пассивті жаттығулар, изотоникалық жаттығулар және пациенттің бұлшықет күшінің деңгейін толығымен ескеретін белсенді жаттығулар [67]. Rutgers Ankle-де пневматикалық жетегі бар параллель робот манипулятор үшін пациенттің тобық буыны кешенін белгілі бір траекториялар бойынша жылжыту үшін пассивті жаттығулар үшін позиция контроллері және белсенді резистивті жаттығулар үшін күш контроллері қолданылды [18, 58]. Оны сынау үшін төрт адам тәжірибеге қатысты [58]. Сонымен қатар,

көптеген зерттеушілер буынмен роботтың үйлесімділігін бақылау схемаларын және қалпына келтіру жаттығуларының әртүрлі әдістерін зерттеді. Бұдан бөлек олар қажетті үйлесімділікке қол жеткізетін атқарушы механизмдерінің жеткілікті жұмсақтығына ие. Jamwal және т.б. кедергіні бақылау негізінде оңалту жаттығуының интерактивті әдісін әзірледі. Бұл пациенттерге робот жасаған қимылдарды өздерінің мүгедектік деңгейіне сәйкес өзгертуге мүмкіндік береді. Осының негізінде әртүрлі кедергіге негізделген төрт жаттығу режимі жасалды [68]. Әзірленген кедергіні басқару схемасының физиотерапевт жұмысына әсерін жою үшін адаптивті кедергіні басқару схемасы ұсынылды. Бұл адаптивті роботты терапияны қамтамасыз ету үшін пациенттердің белсенділігіне параллель робот манипулятор кедергісін адаптациялау үшін жасалды [69]. Лю және басқалары үйлесімді CARR басқару схемасын, соның ішінде буындар кеңістігінде төменгі деңгейлі үйлесімділікті реттеу контроллері мен жоғары деңгейлі өткізгіштік контроллер жұмысын зерттеді [70]. Әрі қарай, CARR тиімділігі мен қауіпсіздігін жақсарту үшін Чжан және басқалары пациенттің қатысуымен ауыспалы параметрлі беріліс коэффициентін реттеуге негізделген адаптивті басқару схемасын зерттеді. Беріліс коэффициентін басқаратын реттегі тобық буынында жүргізілген өлшеулерге сәйкес алдын-ала анықталған траекторияға буынды бейімдеу үшін қолданылды. Сондай-ақ, буын кеңістігінде позиция контроллеріне негізделген пассивті әдіс, тұрақты параметрлі беріліс коэффициентінің контроллеріне негізделген пациент пен роботтың өзара әрекеттесу әдісі және айнымалы параметрлі беріліс коэффициентінің контроллеріне негізделген өзара әрекеттесу әдісі қарастырылды [71]. Сонымен қатар, Айас және басқалары параллель робот манипулятор үшін кездейсоқ логика әдісіне негізделген адаптивті берілу коэффициентін басқару схемасын жасады. Сонымен қатар, Айас және басқалары өздерінің параллель робот манипулятор үшін адаптивті беріліс коэффициентін басқару схемасын жасады. Бұл белсенді ROM жаттығуларымен де, изотоникалық жаттығулармен де пациенттің мүгедектік деңгейін ескере отырып, күш пен кедергі деңгейін адаптациялау үшін жасалды [72].

Жоғарыда келтірілген қорытындыдан қауіпсіздік әрдайым робот-ассистент-нейрологиялық оңалту үшін аса маңызды болып табылатынын көруге болады. Қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін жұмыс кеңістігіндегі үйлесімділікті бақылау ғана емес, сонымен қатар қозғалтқыштар жұмысы мен роботтың үйлесімділігі де маңызды. Пациент белсенді қозғалыс жасауға ынталанғанда жоспарлы түрде буындарда, бұлшықеттерде белгілі бір күш тудырады. Бұл жағдайда, егер параллель робот манипулятор икемді болмаса, шамадан тыс өзара әрекеттесу күштері пайда болуы мүмкін. Осыған байланысты пневматикалық параллель робот манипулятор бірқатар артықшылықтарға ие: пневматикалық бұлшықет жеңіл салмақ пен икемділікке ие, бұл оны пациенттермен табиғи әрекеттесуге ыңғайлы етеді [74]. Осыған сүйене отырып, көптеген пневматикалық бұлшықеттерге негізделген параллель робот манипулятор түрлері үйлесімділікті басқару бойынша зерттеулерге негізделіп әзірленді: мысалы, кедергіні басқару [68], адаптивті кедергіні басқару [69], беріліс коэффициентін басқару [70] және адаптивті беріліс коэффициентін басқару [71]. Олар адам мен роботтың өзара әрекеттесу күшін өлшеу негізінде берілген траекторияны белгілі бір жағдайларға адаптациялай алады. Керісінше, үйлесімділікті басқару схемасы электр жетекті параллель робот манипулятор үшін өте маңызды зерттеу саласы болып табылады. Себебі мұндай жетектерде сәйкестік қасиеттері жоқ. Параллель робот манипулятордың бұл түрі үшін үйлесімділікті басқарудың кедергіні басқару [27, 60] және адаптивті кедергіні басқару [72] сияқты көптеген алгоритмдері зерттелді. Кедергіні, беріліс коэффициентін басқару және олардың мүмкіндіктері алдағы жылдары әрқашан зерттеудің негізгі аспектілері болады.



3 сурет – Қарастырылған параллель робот манипуляторлар

Қарастырылған параллель робот манипулятор түрлерінің ұқсастығы.

Механикалық дизайнын және оның модификациясы. Параллель робот манипулятор мақсаты тобық буыны кешенінде ROM және бұлшықет күшін қалпына келтіруге көмектесу арқылы тобық буынын оңалтудың тиімділігін арттыру болып табылады. Сондықтан параллель робот манипулятор жеткілікті жұмыс кеңістігіне және жылдамдықты беру және күш беру сипаттамалары сияқты керемет кинематикалық сипаттамаларға ие болуы керек. 3 еркіндік дәрежені қамтитын тобық буыны кешенінің барлық қозғалыстарын қанағаттандыру үшін көптеген параллель робот манипулятор 3 еркіндік дәрежемен жасалады, олар [24, 32, 34, 35, 37, 40, 43-45] жұмыстарда сипатталған. Кейбір параллель робот манипуляторда AD/AB қозғалысын шектеу арқылы механизмді жеңілдету үшін тек 2 еркіндік дәреже болады, олар [25, 55] жұмыста көрсетілген. Сонымен қатар, егер екі параллель робот манипулятор платформасының арасындағы топсалар бір-біріне параллель болса (яғни, екі платформадағы байланыс нүктелері симметриялы болса), онда ол параллель робот манипулятордың сингулярлық конфигурациясына әкелуі мүмкін. Параллель робот манипулятор дизайны күрделі және жұмыс кеңістігін барынша көбейтуге қарсы қозғалтқыш күштерін азайту сияқты бірнеше бір-біріне қарама-қайшы мәселелер арасындағы тепе-теңдікті сақтауды талап етеді. Сондықтан пневматикалық және электрлік параллель робот манипуляторда кинематикалық конфигурация және параллель механизмнің конфигурациясын оңтайландыру алгоритмі қолданылады. Jamwal P K., Hussain S. және басқалары өздерінің параллель робот манипулятор кинематикалық дизайнын, қозғалтқыш дизайнын және

құрылымдық дизайнын оңтайландыру үшін көптеген алгоритмдерді қолданды. Мысалы, модификацияланған генетикалық алгоритмдер [31], эволюциялық алгоритмге негізделген доминацияланбаған сұрыптау алгоритмі [75], модификацияланған дифференциалды эволюция алгоритмдері [38], генетикалық алгоритм (BFSGA) [32]. Сондай-ақ, олар алдыңғы кинематика мәселесін (FK) шешу үшін модификацияланған нақтыланбаған деректер жүйесін (FIS) қолданды. Бұл параллель роботтар қатты байланысқан сызықты емес қозғалыстарына байланысты жасалды. Сонымен қатар, FK-ның жалпылама, бір мәнді шешімін алу мүмкін емес [36]. Ванг және басқалар көп объектілі оңтайландыру мәселесін шешу үшін модификацияланған дифференциалды эволюция алгоритмін (DE) ұсынды. Ол механизм алатын кеңістікті, механизмнің кіріс пен шығыс сипаттамаларын және моментті, сондай-ақ көп өлшемді шектеулерді қамтиды [38]. Жоғарыда келтірілген талдау нәтижелерінен механизмдердің конфигурациясына негізделген параллель робот манипулятордың екі түрі бар екенін көруге болады: қозғалтқышы төменгі жағында орналасқан параллель робот манипулятор және жоғарғы жағында параллель робот манипулятор. Қозғалтқышы төменгі жағында орналасқан параллель робот манипулятор дизайны мен басқаруы едәуір жеңілдетсе де, механикалық айналу осьтері тобық буыны кешенінің айналу осьтерінен алыс орналасқан. Параллель робот манипулятордың айналу центрін тобық буыны кешенінің айналу центрімен сәйкестендіру қиын, бұл оңалту кезінде тобық буыны кешенінің кездейсоқ күштерге тап болуына әкелуі мүмкін. Керісінше, жоғары жақта орналасқан қозғалтқыш пациентке робот үстінде бірқалыпты және қозғалыссыз тұруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ол параллель робот манипулятордың айналу осьін тобық буыны кешенінің айналу осьімен сәйкестендіруге. Бұл белгілі бір дәрежеде тобық буыны кешенінің екінші рет жаракаттануын болдырмауға септігін тигізеді.

Қорытындылай келе параллель робот манипулятордың механикалық дизайны мен механизмін оңтайландырудың үш негізгі бағыты бар екенін атап өткен жөн. Біріншісі - пневматикалық немесе электр жетегін қолдану, қозғалтқыштың ең жақсы түрін таңдау, сонымен қатар жетекті параллель робот манипулятордың төменгі немесе жоғарғы жағына орналастыру. Екіншісі - тобық буыны кешенінің барлық 3 еркіндік дәрежесін қамту, осылайша бірқатар DO/PL, IN/EV және AD/AB қозғалыстарды оңалту жаттығуларын тиімді жүзеге асыруға болады. Үшіншісі - қалпына келтіру жаттығуларында қолдануға ыңғайлы болу үшін роботтың кинематикалық дизайнын, жетек дизайнын және параллель робот манипулятордың құрылымдық дизайнын оңтайландыру.

Траекторияны бақылау және интерактивті басқару. Траекторияны бақылауды басқару әдістері мен оңалту жаттығуларының нәтижелерінен олардың барлығы тобық буынын оңалту жаттығуларының режимдерімен байланысты екенін көруге болады. Траекторияны бақылауды басқару параллель робот манипуляторға белгілі бір траектория бойынша тобық буыны кешенін басқаруға көмектесу үшін қолданылады. Бір жағынан, ол пассивті оңалту жаттығуларында қолданылады, оның барысында тобық буыны кешені берілген траектория бойымен дөңгелек қозғалыстармен қозғалады. Бұл пациенттерге шектеулі ROM шамасын қалпына келтіруге көмектеседі, ал қисықтық түрі, жылдамдығы, амплитудасы және қайталану саны сияқты траектория параметрлерін физиотерапевттер пациенттің жағдайына қарай белгілей алады [52, 54-56]. Екінші жағынан, траекторияны бақылауды басқару негізінен өлшенген интерактивті күш пен момент және [60, 67, 71] көрсетілгендей беріліс коэффициентін басқару алгоритмі негізінде параллель робот манипулятордың бұрыштық орнын бақылау үшін беріліс коэффициентін басқару тізбегіндегі позициялық қозғалысты басқаруда қолданылады. Интерактивті басқару негізінен адамның қатысуын көздейтін және көбінесе күш пен момент сенсорларына негізделген белсенді оңалту жаттығуларында қолданылады, бұл пациентке тобық буынының жан-жақты ROM шамасын, бұлшықет күшін және проприоцептивті сезімді

одан әрі қалпына келтіруге көмектеседі. Мұндай интерактивті басқару үшін кедергіні басқару [61, 68, 69] және беріліс коэффициентін басқару әдістері жиі қолданылады [60, 67, 71, 72], бұл басқару жүйесінің үйлесімділігін жақсарта алады, пациенттердің тобық буынын оңалту жаттығуларына деген ынтасын арттырады және оңалту жаттығуларының әсерін жақсартады.

Сонымен қатар, пассивті оңалту жаттығуларын және параллель робот манипулятордың жаттығу ауқымын жақсарту үшін бірыңғай күшті басқару және үйлесімділік дәрежесін иерархиялық басқару қолданылды. Алайда, барлық басқару стратегиялары мен оңалту жаттығуларының режимдері тестілеу кезеңінде және олардың ешқайсысы клиникалық қосымшаларда қолданылмайды.

Қысқаша айтқанда, траекторияны бақылау және интерактивті басқару оңалту жаттығуларының әртүрлі әдістері үшін қолданылады. Бір жағынан, траекторияны бақылау дәлдігі қажетті траектория бойынша тобық буыны кешенін дәл басқара алатындай жоғары болуы керек. Бұл РМА-ның сызықты еместігінен пневматикалық жетегі бар параллель робот манипулятор үшін біршама қиын болуы мүмкін. Сондықтан BBDO, NIFT және ABS-SRS сияқты траекторияны бақылауды басқарудың көптеген алгоритмдері жасалды [49, 51, 52, 54]. Екінші жағынан, белсенді оңалту жаттығулары үшін кедергіні басқару, берілу коэффициентін басқару сияқты интерактивті басқару алгоритмдері қолданылады. Ол пациенттің белсенді қатысуын тиімді ынталандырады және жаттығудың қауіпсіздігін қамтамасыз етеді [60, 61, 67-69, 71, 72].

Қарастырылған параллель робот манипулятор арасындағы айырмашылықтар. Жоғарыда аталған жүйелі талдау мен шолуға сүйене отырып, параллель робот манипулятордың көптеген негізгі бағыттары, әсіресе механикалық конструкциялары әртүрлі болғанына қарамастан, бірдей жетек түрлерін қолданатын параллель робот манипуляторға сәйкес келгенін көреміз.

Параллель робот манипуляторды жақсартудың болашақ шешімдері.

Тобық буынын оңалтуға арналған жаттығулар - бұл оңалту робототехникасының шағын саласы. Аяқтың жоғарғы және төменгі бөліктерін оңалту жұмыстарында өте маңызды нәтижелерге қол жеткізілді. Оңалту жұмыстарында қолданылатын заманауи технологиялар параллель робот манипулятордың дамуына негіз бола алады. Біздің ойымызша, болашақ параллель робот манипулятор зерттеулері механизмді оңтайландыруға, өзгермелі параметрлердің сәйкестігін бақылауға, оңалту жаттығуларының көп режимді әдістеріне, қозғалыс ниетін мультимодальды тануға, сондай-ақ оңтайлы жаттығу терапиясын бағалауға және таңдауға бағытталған.

Механизмдердің жұмысын оңтайландыру. Қолданыстағы параллель робот манипулятордың кемшіліктері бар, мысалы, жеткіліксіз немесе артық DOF мәні, тобық буыны кешенінің айналу осьінің механизмнің айналу осьімен сәйкес келмеуі. Тобық буынын оңалту процесі табан буыны кешенінің орналасуының әртүрлі жағдайларын және науқастың аяғының төменгі бөлігін бір уақытта жылжытуды қажет етеді. Күрделі тармақталған механизм кедергілерге, нашар қозғалыс режимдеріне және пайдаланудың қолайсыздығына оңай әкеледі. Үш еркіндік дәреже, механизмнің айналу осьінің тобық буыны кешенінің осьімен сәйкес келуі, жеткілікті дәрежедегі жұмыс кеңістігі, пайдалану қарапайымдылығы мен шағын өлшем – бұл параллель робот манипулятор механизмдерін жобалауда және оңтайландыруда маңызды мәселе болып табылады. Сонымен қатар, қозғалтқыштардың түрлері үлкен мәнге ие. Жоғарыда айтқанымыздай, пневматикалық жетек негізіндегі PARR жұмысы ішкі үйлесімділікке байланысты үлкен артықшылығына ие, бірақ сызықты емес және уақыт өте келе өзгертін РМА сипаттамаларына байланысты оларды дәл басқару қиын. Электр жетегі бар параллель робот манипуляторды дәл басқаруға болады, бірақ оның ішкі үйлесімділігі жоқ және күрделі, үйлесімділікпен қамтамасыз ету үшін үйлесімділікті басқару алгоритмдерін қолдану қажеттігі туындайды.

Сондықтан, екі жетектің артықшылықтарын біріктіретін қозғалтқыштарды дамыту зерттеудің басым бағыттарының бірі болып табылады, ал кейбір жаңа жетек түрлерін параллель робот манипуляторды дамыту үшін пайдалануға болады.

Айнымалы параметрлермен үйлесімділікті бақылау. Көптеген параллель робот манипулятор түрлері кедергілерді, беріліс коэффициентін және олардың туындыларын бақылау алгоритмдері арқылы үйлесімділікті басқару жүйесінің негізінде жасалды. Алайда, тұрақты параметрлермен үйлесімділікті басқару стратегиясын қолдану ыңғайсыз, өйткені тобық буыны кешенінің механикалық кедергісі оңалту жаттығулары кезінде де, пациенттерге де байланысты өзгереді. Кейбір зерттеушілер беріліс коэффициенттерін [67] және кедергілерді адаптивті басқару жүйесін [69] зерттегенімен, 3 еркіндік дәрежесі бар оңалту роботтарының прототиптерін қолдана отырып, беріліс коэффициенттері мен кедергілерді бірдей, бір уақытта басқарудың стратегиялары мен әдістері әлі де жоқтың қасы. Атап айтқанда, айнымалы параметрлермен үйлесімділікті басқару стратегиясы және кедергілерді басқару жүйесі әлі де модельдеу және зертханалық тәжірибелер сатысында. Айнымалы параметрлермен үйлесімділікті басқару жүйесін тереңірек зерттеу керек. Сонымен қатар, оның тобық буыны кешенінің дисфункция дәрежесіне, ROM шамасына, бұлшықет күшін қалпына келтіру дәрежесіне қарай айнымалы параметрлерді адаптациялау қабілетін зерттеу қажет. Атап айтқанда, айнымалы параметрлері бар үйлесімділік алгоритмдерін есептеу қиын және нақты уақыт режимінде олар төмен өнімділікке ие [69], өйткені адаптация заңдары тек адам мен роботтың өзара әрекеттесуінің өлшенген күшіне және моментіне негізделген. Үйлесімділік параметрлерін реттеу үшін қолданылатын беттік электромиография сигналы (EMG) негізгі зерттеу бағыттарының бірі болып табылады, өйткені EMG сигналдары нақты уақыт режимінде жоғары өнімділікке ие және күш пен момент сенсорларын толықтыра алады.

Қозғалыс жоспарын алдын ала мультимодальды тану. Жоғарыда келтірілген шолудан параллель робот манипулятордың ешқайсысы белсенді оңалту жаттығуларында EMG сигналдарын қолданбайтынын аңғаруға болады. Қазіргі уақытта параллель робот манипулятор да кеңінен қолданылатын сенсорларға күш пен момент сенсоры жатады [60-67]. Алайда, аяқ қозғалысы әрқашан адам денесі қозғалғысы келгеннен кейін пайда болады. Алдын ала болжау нәтижесі - бұл нақты ниет таныту емес, тек қозғалыс ниетінің жанама әсері болып табылады. EMG сигналдары адам денесінің қозғалыс ниетін шындап көрсете алады, өйткені бұлшықет пен жүйке сигналдары электромеханикалық кідіріс деп аталатын күш пайда болғанға дейін шығарылады [70]. Оңалту роботтарын қолдану кезінде қозғалыс ниетін тану үшін EMG көмегімен көптеген зерттеулер жүргізілді. EMG сигналы белсенді жаттығуларды неғұрлым нақты және ыңғайлы ету үшін белсенді жіліншік табан буыны жаттығуларына қосылуы керек, дегенмен EMG сигналдары орналасу, шаршау сияқты әртүрлі факторлардың әсерінен өзгеруі мүмкін.

Оңтайлы физикалық терапияны бағалау және таңдау. Параллель робот манипулятор науқастарға шектеулі ROM қалыптастыруға, әлсіз бұлшықеттерді нығайтуға, динамикалық тепе-теңдік пен қозғалыс функцияларын қалпына келтіруге көмектесу үшін қолданылады. Алайда, параллель робот манипулятордың көпшілігі тек сау адамдарда және аз бөлігі күрделі тобық буыны дисфункциясы бар пациенттерде сыналды [69-71]. Осылайша, қазіргі зерттеулер клиникалық зерттеулерден өзгеше. Сонымен қатар, терапия әр пациенттің қажеттіліктері мен мүмкіндіктеріне бейімделуі керек, өйткені «барлығына бір өлшем» қағидасы бойынша емдеуден аулақ болу керек, өйткені әртүрлі науқастардағы ROM және бұлшықет күші әртүрлі болады. Осылайша, дисфункция дәрежесін бағалау және пациентке және оңалту сатысына байланысты емдік дене шынықтырудың оңтайлы жолдарын әзірлеу клиникалық зерттеулер тұрғысынан өте маңызды болып табылады. Егер параллель робот манипулятор тек ғылыми зерттеулер объектісі ғана емес, клиникалық оңалту процесіне арналатындай болса, бұл жаңа зерттеу бағытына айналатын болады.

Қорытынды.

Бұл шолуда негізінен пневматикалық және электр жетегі бар параллель робот манипулятор түрлері жалпыланған, және атқарушы механизмдердің конфигурациялары, траекторияны бақылаудың әртүрлі әдістері мен оңалту әдістерін ескере отырып зерттелген. Қарастырылған параллель робот манипулятор арасындағы айырмашылықтар мен ұқсастықтарды салыстыру, талдау және жалпылау арқылы механикалық дизайн мен интерактивті басқару стратегияларын жақсарту үшін одан да көп жұмыс істеу керек екенін көреміз. Бұл пациенттің барынша қауіпсіздігін қамтамасыз ету және оңалту нәтижелерін жақсарту үшін қажет. Соңғы екі онжылдықта параллель робот манипуляторды дамытуда және жетілдіруде айтарлықтай прогреске қол жеткізілді, оның механикалық дизайны мен басқару стратегиялары пневматикалық және электр жетегі бар параллель робот манипулятор үшін айтарлықтай жақсартылды. Атқарушы механизмнің айналу осы тобық буыны кешенінің айналу осымен сәйкес келетіндей етіп параллель робот манипуляторды тек үш еркіндік дәрежемен дамыту механизмдерді жобалау және параллель робот манипулятор оңтайландыру үшін өте маңызды. Басқару стратегиясына келетін болсақ, нақты уақыттағы жұмысты жақсарту үшін EMG сигналын қосып, айнымалы параметрлермен үйлесімділікті басқаруды толығырақ зерттеу керек. Мультимодальдық қозғалыс ниетін танумен көп режимді оңалту жаттығулары әдістері, нақты уақыттағы онлайн анықтау және бағалау жүйесі мүгедектіктің әртүрлі кезеңдерінің қажеттіліктерін қанағаттандыру және тобық буынын тиімді оңалту үшін жасалуы керек. Жақын арада пневматикалық және электр жетегімен үйлестірілген ең жақсы қасиеттерге ие параллель робот манипулятор түрлері пайда болады. Осы саладағы зерттеу бағыттары мен тенденциялары негізінен механизмді оңтайландыруға, айнымалы параметрлердің сәйкестігін бақылауға, әртүрлі тобық буынын оңалту кезеңдеріне тән қалпына келтіру жаттығуларының көп режимді әдістеріне, қозғалыс ниетін мультимодальды тануға, сондай-ақ оңтайлы жаттығу терапиясын бағалауға және таңдауға бағытталған.

Сондай-ақ, параллель робот манипулятор бірнеше адамның қатысуымен ғана клиникалық сынақтардан өтті, барлық басқару стратегиялары мен оңалту жаттығуларының режимдері әлі күнге дейін тестілеу кезеңінде және әзірше олардың ешқайсысы клиникалық қосымшаларда қолданылмайды. Тобық буынын оңалтуға арналған кейбір қарапайым құрылғылар қазірдің өзінде коммерциялық мақсатта қолданылады, мысалы, Шанхай Fourier Intelligent Technology Co компаниясының AnkleMotus., Ltd, Қытай, және EasyTech бастап Minitalus, Италия. Алайда, олар белгілі бір функцияларды орындау жаттығуларына немесе тобық буынының бір DOF шамасына ғана арналған. Оңалту жаттығуларының неғұрлым күрделі функциясына арналған параллель робот манипулятор түрлері тез дамып келеді және олардың кейбіреулері клиникалық сынақтардан өтіп жатыр. Бір - екі жыл ішінде оңалту тренингінің толық жиынтығы бар параллель робот манипулятор клиникалық практикада қолданылуы мүмкін деп күтілуде. Жалпылама, бұл зерттеу жұмысының мақсаты параллель робот манипулятор саласындағы зерттеулер мен технологияларға жүйелі шолу болып табылады.

Бұл шолудағы біздің көздеген негізгі мақсатымыз - болашақ зерттеушілерді параллель робот манипулятор тобық буынының дисфункциясы бар науқастарға арналған жетілдірілген құрылғыларды жасауға бағыттау. Бұл шолу болашақ көмекші роботтарды әзірлеушілер үшін пайдалы ресурс болады және осы саланың ары қарай дамуына ықпал етеді деп үміттенеміз.

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

ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Mozafarian DB, Benjamin EJ, Go AS, et al. heart disease and stroke statistics-2015 Update: a report from the American heart association. *Circulation*. 2015;133(4): e38–360.
- [2] Zeng X, Zhu G, Zhang M, et al. Reviewing clinical effectiveness of active training strategies of platform-Based ankle rehabilitation robots. *J Health care Eng*. 2018; 2018:1–12.
- [3] Zhang M, Zhu G, Nandakumar A, et al. A virtual-reality tracking game for use in robot-assisted ankle rehabilitation. In: *IEEE/ASME International Conference on Mechatronic & Embedded Systems & Applications (MESA)*, Senigallia. 2014, pp. 1-4.
- [4] Khalid YM, Gouwanda D, Parasuraman S. A review on the mechanical design elements of ankle rehabilitation robot. In: *Proceedings of the institution of mechanical engineer's part H journal of engineering in medicine*. 2015, p. 452–63.
- [5] Li J, Zhang Z, Tao C, et al. A number synthesis method of the self-adapting upper-limb rehabilitation exoskeletons. *Int J Adv Robot Syst*. 2017; 14(3):1–14.
- [6] Latham NK, Jette DU, Warren RL, et al. Pattern of functional change during rehabilitation of patients with hip fracture. *Archiv Phys Med Rehabil*. 2006; 87(1):111–6.
- [7] Burdea GC, Cioi D, Kale A, et al. Robotics and gaming to improve ankle strength, motor control, and function in children with cerebral palsy-a case study series. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2013; 21(2):165–73.
- [8] Zhu G, Zeng X, Zhang M, et al. Robot-assisted ankle rehabilitation for the treatment of drop foot: A case study. In: *IEEE/ASME International conference on mechatronic & embedded systems & applications (MESA)*. 2016, pp. 1-5.
- [9] Farjadian A B, Nabian M, Hartman A, et al. Position versus force control: Using the 2-DOF robotic ankle trainer to assess ankle's motor control. In: *2014 36th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society, Chicago, IL*. 2014, p. 1186–9.
- [10] Mirelman A, Bonato P, Deutsch JE. Effects of training with a robot-virtual reality system compared with a robot alone on the gait of individuals after stroke. *Stroke*. 2009; 40(1):169–74.
- [11] Chen K, Wu YN, Ren Y, et al. Home-based versus laboratory-based robotic ankle training for children with cerebral palsy: a pilot randomized comparative trial. *Archiv Phys Med Rehabil*. 2016;97(8):1237–43.
- [12] Zhang M, Davies TC, Xie S. Effectiveness of robot-assisted therapy on ankle rehabilitation—a systematic review. *J NeuroEng Rehabil*. 2013; 10(1):30.
- [13] Hussain S, Jamwal PK, Ghayesh MH. State-of-the-art robotic devices for ankle rehabilitation: mechanism and control review. *Proc Instit Mech Eng*. 2017; 231(12):1224–34.
- [14] Miao Q, Zhang M, Wang C, et al. Towards optimal platform-based robot design for ankle rehabilitation: the state of the art and future prospects. *J Healthc Eng*. 2018; 2018:1–9.
- [15] Marian G. Alvarez-Perez, Mario A. Garcia-Murillo, J. Jesús Cervantes Sánchez. Robot-assisted ankle rehabilitation: a review, disability and rehabilitation. *Assist Technol*. 2020; 15(4):394–408.
- [16] Girone M, Burdea G, Bouzit M. The Rutgers ankle orthopedic rehabilitation interface. In: *Proceedings of the ASME dynamic systems and control division*. Nashville, TN, Nov. 1999, p. 305-12.
- [17] Siegler S, Chen J, Schneck CD. The three-dimensional kinematics and flexibility characteristics of the human ankle and subtalar joint-Part I: Kinematics. *J Biomech Eng*. 1988; 110(4):364–73.
- [18] Boian R F, Kourtev H, Erickson K, et al. Dual Stewart-platform gait rehabilitation system for individual's post-stroke. In: *Presented at International Workshop on Virtual Rehabilitation Piscataway Nj*. 2003, pp. 92.

- [19] Yoon J, Ryu J. A new family of 4-DOF parallel mechanisms (1T-3R and 2T-2R) with two platforms and its application to a footpad device. In: ASME 2004 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference, Vol 2: 28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B. 2004, p. 257-65.
- [20] Yoon J, Ryu J. A novel reconfigurable ankle/foot rehabilitation robot. IEEE international conference on robotics & automation. IEEE, 2005; –5.
- [21] Dai JS, Zhao T, Nester C. Sprained ankle physiotherapy-based mechanism synthesis and stiffness analysis of a robotic rehabilitation device. *Autonom Robots*. 2004; 16(2):207–18.
- [22] Liu G, Gao J, Yue H, et al. Design and kinematics analysis of parallel robots for ankle rehabilitation. IEEE/RSJ international conference on intelligent robots & systems. IEEE, 2006; 253–8.
- [23] Saglia J A, Tsagarakis N G, Dai J S, et al. A high performance 2-dof overactuated parallel mechanism for ankle rehabilitation. 2009 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2009; 2180-2186.
- [24] Saglia JA, Tsagarakis NG, Dai JS, et al. Inverse-kinematics-based control of a redundantly actuated platform for rehabilitation. *Proc Instit Mech Eng*. 2009; 223(1):53–70.
- [25] Saglia J A, Tsagarakis N G, Dai J S, et al. Control strategies for ankle rehabilitation using a high-performance ankle exerciser. 2010 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2010; 2221–7.
- [26] Saglia JA, Tsagarakis NG, Dai JS, et al. A high-performance redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation. *Int J Robot Res*. 2009; 28(9):1216–27.
- [27] Hamid R, Mozafar S, Alireza R, et al. Path planning of the hybrid parallel robot for ankle rehabilitation. *Robotica*. 2016; 34:173–84.
- [28] Rastegarpanah A, Rakhodaei H, Saadat M, Path-planning of a hybrid parallel robot using stiffness and workspace for foot rehabilitation. *Adv Mech Eng*. 2018; 10:1–10.
- [29] Jamwal PK, Xie S, Aw KC. Kinematic design optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using modified genetic algorithm. *Robot Autonom Syst*. 2009;57(10):1018–27.
- [30] Jamwal P K, Hussain S. Design optimization of a cable actuated parallel ankle rehabilitation robot: A fuzzy based multi-objective evolutionary approach. *J Intellig Fuzzy Syst*. 2016; 25:1897–1908.
- [31] Jamwal PK, Hussain S. Multicriteria design optimization of a parallel ankle rehabilitation robot: fuzzy dominated sorting evolutionary algorithm approach. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*. 2016; 46(5):589–97.
- [32] Zhang M, Cao J, Zhu G, et al. Reconfigurable workspace and torque capacity of a compliant ankle rehabilitation robot (CARR). *Robot Autonom Syst*. 2017; 98:213–21.
- [33] Tsoi Y H, Xie S Q. Design, and control of a parallel robot for ankle rehabilitation. In: 15th international conference on mechatronics and machine vision in practice. 2008, p. 515-520.
- [34] Jamwal PK, Xie SQ, Tsoi YH, et al. Forward kinematics modelling of a parallel ankle rehabilitation robot using modified fuzzy inference. *Mech Mach Theory*. 2010; 45(11):1537–54.
- [35] Wang C, Fang Y, Guo S, Chen Y. Design and kinematical performance analysis of a 3 – RUS/RRR redundantly actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation. *J Mech Robot*. 2013; 5(4):041003-041003-11.
- [36] Wang C, Fang Y, Guo S. Multi-objective optimization of a parallel ankle rehabilitation robot using modified differential evolution algorithm. *Chin J Mech Eng*. 2015;28(4):702–15.
- [37] Wang C, Fang Y, Guo S, et al. Design and kinematic analysis of redundantly actuated parallel mechanisms for ankle rehabilitation. *Robotica*. 2015; 33(02):366–84.

- [38] Cazalilla J, Vallés M, Mata V, et al. Adaptive control of a 3-DOF parallel manipulator considering payload handling and relevant parameter models. *Robot Comput Integr Manufact.* 2014, p. 468–77.
- [39] Abu-Dakk FJ, Valera A, Escalera JA, et al. Trajectory adaptation and learning for ankle rehabilitation using a 3-PRS parallel robot. In: *International conference on intelligent robotics and applications.* 2015, p. 1–8.
- [40] Vallés Marina, Cazalilla José, Valera Ángel, et al. A 3-PRS parallel manipulator for ankle rehabilitation: towards a low-cost robotic rehabilitation. *Robotica.* 2017; 35:1939–57.
- [41] Zhang L, Li J, Dong M, et al. Design and workspace analysis of a parallel ankle rehabilitation robot (PARR). *J Healthc Eng.* 2019; 4:1–10.
- [42] Li J, Zuo S, Zhang L, et al. Mechanical design and performance analysis of a novel parallel robot for ankle rehabilitation. *J Mech Robot.* 2020;12(5):051007.
- [43] Zuo S, Li J, Dong M, et al. Design and performance evaluation of a novel wearable parallel mechanism for ankle rehabilitation. *Front Neurobot.* 2020; 14:1–14.
- [44] Dong M, Kong Y, Li J, et al. Kinematic calibration of a parallel 2-UPS/RRR ankle rehabilitation robot. *Journal of Healthcare Engineering,* 2020, 3053629.
- [45] Meng W, Liu Q, Zhang M, et al. Compliance adaptation of an intrinsically soft ankle rehabilitation robot driven by pneumatic muscles. In: *IEEE international conference on advanced intelligent mechatronics.* IEEE. 2017, p. 82–87.
- [46] Jamwal P K, Xie S, Farrant J. Fuzzy control of a pneumatic muscle driven parallel robot for ankle rehabilitation. In: *ASME 2009 international design engineering technical conferences & computers & information in engineering conference.* 2009, pp. 1–10.
- [47] Jamwal PK, Xie SQ, Hussain S, et al. An adaptive wearable parallel robot for the treatment of ankle injuries. *IEEE/ASME Trans Mechatron.* 2014; 19(1):64–75.
- [48] Jamwal PK, Hussain S, Tsoi YH, et al. Musculoskeletal model for path generation and modification of an ankle rehabilitation robot. *IEEE Trans Hum Mach Syst.* 2020; 50(5):373–83.
- [49] Meng W, Xie SQ, Liu Q, et al. Robust iterative feedback tuning control of a compliant rehabilitation robot for repetitive ankle training. *IEEE/ASME Trans Mechatron.* 2017; 22(1):173–84.
- [50] Ai Q, Zhu C, Zuo J, et al. Disturbance-estimated adaptive backstepping sliding mode control of a pneumatic muscles-driven ankle rehabilitation robot. *Sensors.* 2018; 18(1):66.
- [51] Zuo J, Meng W, Liu Q, et al. Coupling Disturbance Compensated MIMO Control of Parallel Ankle Rehabilitation Robot Actuated by Pneumatic Muscles. In: *2019 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS), Macau, China.* 2019, pp. 6608–13.
- [52] Zhang M, McDaid A, Veale AJ, et al. Adaptive robot with trajectory tracking control of a parallel ankle rehabilitation joint-space force distribution. *IEEE Access.* 2019; 7:85812–20.
- [53] Ayas MS, Altas IH, Sahin E. Fractional order-based trajectory tracking control of an ankle rehabilitation robot. *Trans Instit Measur Control.* 2016; 40(2):550–64.
- [54] Ayas MS, Altas IH. Designing and implementing a plug-in type of repetitive controller for a redundantly actuated ankle rehabilitation robot. *Proc Instit Mech Eng.* 2018; 232(5):592–607.
- [55] Krebs HI, Volpe BT, Aisen ML, et al. Increasing productivity and quality of care: Robot-aided neurorehabilitation. *J Rehabil Res Dev.* 2000; 37(6):639–52.
- [56] Girone M, Burdea G, Bouzit M, et al. Orthopedic rehabilitation using the “Rutgers ankle” interface. *Studies in Health Technology & Informatics.* 2000; 89–95.
- [57] Yoon J, Ryu J, Lim KB. Reconfigurable ankle rehabilitation robot for various exercises: research articles. *J Robot Syst.* 2005; 22(S1):15–33.

[58] Saglia JA, Tsagarakis NG, Dai JS, et al. Control strategies for patient-assisted training using the ankle rehabilitation robot (ARBOT). *IEEE/ASME Trans Mechatron.* 2013;18(6):1799–808.

[59] Tsoi Y H, Xie S Q. Impedance control of ankle rehabilitation robot. In: *IEEE international conference on robotics & biomimetics.* IEEE. 2009, p. 840–5.

[60] Tsoi Y H, Xie S Q, Graham A E. Design, modeling and control of an ankle rehabilitation robot. In: Liu D, et al., Eds. *Design and control of intelligent robotic systems.* Berlin: Springer. 2009, p. 377–99.

[61] Tsoi Y H, Xie S Q, Mallinson G D. Joint force control of parallel robot for ankle rehabilitation. In: *IEEE international conference on control & automation.* IEEE. 2010, p. 1856–61.

[62] Tsoi Y H. Modelling and adaptive interaction control of a parallel robot for ankle rehabilitation. University of Auckland. 2011, <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/6756>.

[63] Li J, Fan W, Dong M. Research on control strategies for ankle rehabilitation using parallel mechanism. *Cogn Comput Syst.* 2020; 2(3):105–11

[64] Li J, Fan W, Dong M, et al. Implementation of passive compliance training on a parallel ankle rehabilitation robot to enhance safety. *Ind Robot.* 2020; 47(5):747–55.

[65] Dong M, Fan W, Li J, et al. A new ankle robotic system enabling whole-stage compliance rehabilitation training. In: *IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2020, Early access,* <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.3022165>.

[66] Jamwal PK, Hussain S, Ghayesh MH, et al. Impedance control of an intrinsically compliant parallel ankle rehabilitation robot. *IEEE Trans Ind Electron.* 2016; 63(6):3638–47.

[67] Jamwal PK, Hussain S, Ghayesh MH, et al. Adaptive impedance control of parallel ankle rehabilitation robot. *J Dynam Syst Meas Control.* 2017; 139:1–7.

[68] Liu Q, Liu A, Meng W, et al. Hierarchical compliance control of a soft ankle rehabilitation robot actuated by pneumatic muscles. *Front Neurorobot.* 2017; 11:1–19.

[69] Zhang M, Xie SQ, Li X, et al. Adaptive patient-cooperative control of a compliant ankle rehabilitation robot (CARR) with enhanced training safety. *IEEE Trans Ind Electron.* 2018; 65(2):1398–407.

[70] Ayas MS, Altas IH. Fuzzy logic based adaptive admittance control of a redundantly actuated ankle rehabilitation robot. *Control Eng Pract.* 2017; 59:44 – 54.

[71] Zhu L, Shi X, Chen Z, et al. Adaptive servomechanism of pneumatic muscle actuators with uncertainties. *IEEE Trans Ind Electron.* 2016; 64(4):3329–37.

Нұрсұлтан Жетенбаев, магистр, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, nursultan.zhetenbaev@mail.ru

Акнур Дуйсебаева, докторант, Satbayev University, Алматы, Казахстан, aknurt2014@gmail.com

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

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

Динара Сейсенова, магистр, преподаватель, Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, d.seisenova@aes.kz

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РОБОТ-МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ

Аннотация. В данной статье подробно описаны типы параллельных робот-манипуляторов с пневматическим и электрическим приводом, а также изучены конфигурации исполнительных механизмов, с учетом различных методов контроля траектории и методов реабилитации. Рассмотренный параллельный робот-манипулятор показывает, что ему нужно еще больше работать над улучшением механического дизайна и интерактивных стратегий управления путем сравнения, анализа и обобщения различий и сходств между ними. Надеемся, что данная статья станет полезным ресурсом для будущих разработчиков роботов-помощников и будет способствовать дальнейшему развитию данной отрасли.

Ключевые слова. Параллельный робот-манипулятор, робот-манипулятор для реабилитации голеностопного сустава, медицинское устройство, тип привода, линейный электропривод, пневматический привод.

Nursultan Zhetenbayev, master's degree, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, nursultan.zhetenbaev@mail.ru

Aknur Duisebayeva, Doctoral student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, aknurt2014@gmail.com

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

Beibit Shingissov, PhD, PhD, Associate Professor, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, b.shingisov@alt.edu.kz

Dinara Seisenova, master's degree, teacher, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, d.seisenova@aes.kz

THE CURRENT STATE OF PARALLEL ROBOT MANIPULATORS FOR REHABILITATION

Abstract. This paper presents describes in detail the types of parallel robot manipulators with a pneumatic and electric drive, and the configurations of executive mechanisms, taking into account various methods of trajectory control and rehabilitation methods, are studied. The considered parallel robot shows that even more work needs to be done to improve mechanical design and interactive control strategies by comparing, analyzing and generalizing the differences and similarities between the manipulator. We hope that this article will be a useful resource for future assistant robot developers and will contribute to the further development of this industry.

Keywords. Parallel robot manipulator, robot manipulator for ankle joint rehabilitation, Medecine device, drive type, linear electric drive, pneumatic drive.
