

АМАНОВ БЕКЗАТ ОНДАСЫНУЛЫ
Гуманоид тәріздес робот қолының динамикасы және басқаруы
6D060300 – Механика
мамандығы бойынша
Философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін
АННОТАЦИЯ

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

Қазіргі таңда робототехника мен мехатроника салаларының даму бағыты тек жоғары дәлдікті, жоғары жылдамдықты және қайталанғыш қозғалысты қамтамасыз ететін жүйелерді ғана емес, сонымен қатар адаммен қауіпсіз, икемді және бейімделгіш түрде әрекеттесе алатын интеллектуалды роботтық құрылғыларды жасауға қарай бет бұрып отыр. Әсіресе гуманоид роботтар мен көп еркіндік дәрежелі робот қолдары өндірісте, сервистік салада, медицинада, телеоперацияда, қашықтан басқару жүйелерінде және жоғарғы аяқ-қолды реабилитацияға арналған робототехникада кеңінен қарастырылуда. Осындай жағдайда робот қолының қозғалысын тек геометриялық тұрғыдан ғана емес, оның физикалық табиғатын, динамикалық қасиеттерін және нақты басқару заңдарын ескере отырып зерттеу аса өзекті ғылыми-техникалық міндет болып табылады.

Гуманоид робот қолының қозғалысы көпбуынды, бейсызық, өзара байланысқан динамикалық жүйе ретінде сипатталады. Мұнда әр буынның қозғалысы басқа буындарға әсер етеді, ал роботтың соңғы атқарушы органы кеңістікте тек белгілі бір орынға жетіп қана қоймай, берілген траекторияны, бағдарды және қозғалыс тегістігін сақтауы тиіс. Сондықтан мұндай жүйені зерттеу кезінде кинематика, динамика, траекторияны жоспарлау, тура және кері есептер, басқару теориясы, сандық модельдеу және инженерлік жобалау өзара тығыз байланыста қарастырылуы қажет.

Диссертация тақырыбының өзектілігі екі нақты қолданбалық бағытпен де негізделеді. Біріншісі — қашықтан басқару. Бұл жағдайда робот қолы оператордың немесе басқарушы жүйенің нұсқауы бойынша дәл, түсінікті, табиғи және визуалды сенімді қозғалыс жасауы керек. Робот қолының қимылы адамның қабылдауына ыңғайлы, end-effector жолы геометриялық тұрғыдан орынды, ал басқару жүйесі орнықты болуы тиіс. Екінші бағыт — жоғарғы аяқ-қолды реабилитацияға арналған роботтық жүйелер. Бұл жағдайда робот қолы адаммен тікелей физикалық байланыста жұмыс істейді, сондықтан оның қозғалысы жұмсақ, қауіпсіз, физиологиялық тұрғыдан қолайлы және пациенттің нақты жағдайына бейімделген болуы қажет. Осы екі түрлі, бірақ өзара байланысты міндетті бір гуманоид робот қолы шеңберінде қарастыру осы диссертацияның ғылыми және практикалық маңызын айқындайды.

Гуманоид робот қолын зерттеу саласында классикалық кинематикалық және динамикалық әдістер кеңінен белгілі болғанымен, дәл траекториялық басқару мен қауіпсіз күштік өзара әрекеттесуді бір платформа шеңберінде негіздеу, сонымен қатар оны қашықтан басқару және реабилитацияға арналған сценарийлермен байланыстыра талдау әлі де толық шешімін тапқан жоқ. Осыған байланысты 6-DOF гуманоид робот қолының математикалық моделін құру, оның динамикалық қасиеттерін зерттеу, траекторияны жоспарлау әдістерін салыстыру, computed-torque control және импеданстық басқару тәсілдерін негіздеу, сондай-ақ нақты прототип параметрлерімен байланысты сандық модельдеу жүргізу ғылыми тұрғыдан өзекті және қолданбалы мәні жоғары мәселе болып табылады.

Жұмыстың мақсаты

Диссертациялық жұмыстың мақсаты — қашықтан басқару және реабилитацияға арналған міндеттерге бейімделген екі мақсатты 6-DOF гуманоид робот қолының кинематикалық, динамикалық және басқару модельдерін әзірлеу, траекторияны жоспарлау әдістерін ғылыми тұрғыдан негіздеу және соңғы атқарушы органның дәл, қауіпсіз әрі бейімделгіш қозғалысын қамтамасыз ететін тиімді басқару алгоритмдерін ұсыну.

Зерттеу объектісі

Зерттеу объектісі — екі мақсатты 6-DOF гуманоид робот қолы.

Зерттеу пәні

Зерттеу пәні — екі мақсатты 6-DOF гуманоид робот қолының кинематикасы, динамикасы, траекторияны жоспарлау әдістері, басқару жүйелері және оның қашықтан басқару мен реабилитацияға арналған режимдердегі қозғалыс ерекшеліктері.

Зерттеу міндеттері

Диссертацияда қойылған мақсатқа жету үшін келесі негізгі міндеттер шешілді:

- гуманоид робот қолдар, манипуляторлар, қашықтан басқару, реабилитацияға арналған робототехника, адам–робот өзара әрекеттесуі, кинематика, динамика және басқару салаларындағы ғылыми әдебиеттерге талдау жүргізу;
- екі мақсатты 6-DOF гуманоид робот қолының құрылымдық сұлбасын негіздеу және оның функционалдық ерекшеліктерін анықтау;
- D–H параметрлері негізінде робот қолының тура және кері кинематика есептерін шығару;
- робот қолының жұмыс кеңістігін, сингулярлық конфигурацияларын және Якобиан матрицасын талдау;
- Эйлер–Лагранж әдісі негізінде робот қолының динамикалық моделін құру;
- робот қолының буындары үшін масса, масса центрі және инерция тензоры сияқты массалық-инерциялық параметрлерді инженерлік модель арқылы анықтау;
- сызықтық интерполяция, кубтық полиномдар, бесінші дәрежелі полиномдар, РТР, LIN және адаптивті траекторияны жоспарлау әдістерін зерттеу және салыстырмалы талдау жүргізу;
- адаммен және ортамен қауіпсіз күштік өзара әрекеттесу үшін импеданстық басқару әдісін негіздеу;
- MATLAB ортасында робот қолының тура және кері динамикасын, траекторияны қадағалауын және басқару алгоритмдерін сандық тексеру;
- SolidWorks ортасында робот қолының 3D инженерлік прототипін әзірлеу және теориялық модельді нақты конструкция параметрлерімен байланыстыру.

Зерттеу әдістері

Зерттеуде робототехника, механика және басқару теориясында кеңінен қолданылатын классикалық және заманауи әдістер пайдаланылды. Кинематикалық модельдеу D–H параметрлеуі негізінде орындалды. Робот қолының кеңістіктегі орны мен бағдарын сипаттау үшін біртекті түрлендіру матрицалары қолданылды. Тура кинематикада буын айнымалылары бойынша соңғы атқарушы органның позасы анықталса, кері кинематикада end-effector күйі бойынша буын бұрыштары табылды. Кері кинематикада аналитикалық, яғни closed-form тәсіл қолданылды.

Робот қолының динамикалық теңдеулері Эйлер–Лагранж әдісі арқылы шығарылды. Бұл әдіс жүйенің толық кинетикалық және потенциалдық энергияларын ескере отырып, жалпыланған координаталар бойынша қозғалыс теңдеулерін алуға мүмкіндік берді. Жылдамдықтар, буындық қозғалыс пен декарттық кеңістік арасындағы байланыстарды сипаттау үшін Якобиан матрицасы пайдаланылды. Жанасу және күштік өзара әрекеттесу мәселелерін қарастыруда күштер мен моменттердің буындарға берілу логикасы талданды.

Сандық модельдеу MATLAB ортасында жүргізілді. Forward dynamics және inverse dynamics есептері MATLAB-та сандық түрде іске асырылып, робот қолының қозғалыс траекториялары, буын бұрыштарының уақыт бойынша өзгерісі, басқарушы моменттер және соңғы атқарушы органның кеңістіктегі қозғалысы зерттелді. Инженерлік және геометриялық модельдеу SolidWorks ортасында орындалды. Әр буын үшін масса, масса центрі және инерция тензоры есептеліп, динамикалық модельде қолданылды.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы келесі нәтижелермен сипатталады:

- қашықтан басқару және реабилитацияға арналған міндеттерді бір 6-DOF гуманоид робот қолы аясында қарастыруға арналған тұтас ғылыми-әдістемелік негіз ұсынылды;

- D–H параметрлері негізінде 6-DOF гуманоид робот қолының толық кинематикалық моделі құрылып, тура және closed-form кері кинематика шешімдері жүйеленді;
- робот қолының жұмыс кеңістігі, сингулярлық конфигурациялары және Якобиан матрицасы қашықтан басқару мен реабилитацияға арналған міндеттер тұрғысынан талданды;
- Эйлер–Лагранж әдісі негізінде алынған динамикалық модель нақты прототиптің массалық-инерциялық параметрлерімен байланыстырылды;
- траекторияны жоспарлау әдістері олардың қолданбалық мақсатына қарай, яғни дәл қозғалыс, геометриялық жол, қозғалыс тегістігі және қауіпсіз бейімделу талаптарына сәйкес салыстырмалы түрде негізделді;
- бос кеңістіктегі дәл қозғалыс үшін есептелген моментті басқару, ал адаммен өзара әрекеттесудегі қауіпсіздік үшін импеданстық басқару әдістерін біртұтас роботтық архитектурада қолданудың орынды екені көрсетілді;
- реабилитацияға арналған режимдер үшін виртуалды масса, бәсеңдету және қаттылық параметрлерін таңдау қағидалары ұсынылды;
- MATLAB-та forward dynamics және inverse dynamics модельдері арқылы траекторияны қадағалау, басқарушы моменттер және жүйенің динамикалық жауабы сандық түрде тексерілді.

Теориялық және практикалық маңыздылығы

Зерттеудің теориялық маңыздылығы 6-DOF гуманоид робот қолының кинематикалық, динамикалық және басқару модельдерін кешенді түрде жүйелеуінде көрінеді. Жұмыста робот қолының қозғалысын тек кинематика немесе тек басқару тұрғысынан емес, толық жүйе ретінде қарастыру жүзеге асырылды. Бұл робототехникадағы көпбуынды жүйелерді зерттеудің теориялық негіздерін толықтырады және дәл траекториялық басқару мен қауіпсіз күштік өзара әрекеттесудің бір жүйеде қалай үйлесетінін түсіндіруге мүмкіндік береді.

Практикалық маңыздылығы ұсынылған модельдер мен алгоритмдердің нақты инженерлік жүйелерді жобалауда қолданылу мүмкіндігімен анықталады. Диссертация нәтижелері қашықтан басқарылатын сервистік роботтарда, әлеуметтік роботтарда, бағыт көрсететін робот қол жүйелерінде, сондай-ақ жоғарғы аяқ-қолды реабилитацияға арналған интеллектуалды роботтық құрылғыларда пайдаланылуы мүмкін. SolidWorks пен MATLAB негізінде әзірленген инженерлік және сандық модельдер робот қолының әрі қарайғы аппараттық прототипін жетілдіруге және нақты басқару бағдарламаларын жасауға негіз бола алады.

Қорғауға шығарылатын ғылыми нәтижелер

Қорғауға келесі ғылыми нәтижелер шығарылады:

- екі мақсатты 6-DOF гуманоид робот қолының құрылымдық-функционалдық моделі;
- робот қолының D–H параметрлері негізіндегі тура және кері кинематика шешімдері;
- жұмыс кеңістігі, сингулярлық конфигурациялар және Якобиан матрицасына байланысты алынған нәтижелер;
- Эйлер–Лагранж әдісі негізінде алынған динамикалық модель;
- сызықтық, кубтық, бесінші дәрежелі полиномдар, PTP, LIN және адаптивті траекторияны жоспарлау әдістеріне жүргізілген салыстырмалы талдау;
- бос кеңістіктегі дәл қозғалыс үшін есептелген моментті басқару әдісі;
- адаммен қауіпсіз өзара әрекеттесу үшін импеданстық басқару әдісі;
- реабилитацияға арналған режимдер үшін адаптивті импеданс параметрлерін таңдау қағидалары;
- MATLAB және SolidWorks негізіндегі сандық және инженерлік модельдеу нәтижелері.

Диссертацияның ғылыми ережелерінің, тұжырымдары мен нәтижелерінің дұрыстығы мен негізділігі

Диссертацияда алынған ғылыми нәтижелердің дұрыстығы мен негізділігі робототехника мен механикада кеңінен танылған D–H параметрлеуі, Эйлер–Лагранж әдісі, Якобиандық талдау, классикалық траекторияны жоспарлау тәсілдері және модельге негізделген басқару теориясының қағидаларын қолданумен қамтамасыз етіледі. Forward dynamics және inverse dynamics есептері MATLAB ортасында сандық түрде тексеріліп, қозғалыс, моменттер және қадағалау дәлдігі бойынша теориялық нәтижелермен сәйкестігі бағаланды. SolidWorks негізінде алынған массалық-инерциялық параметрлер модельдің инженерлік негізділігін арттырды.

Диссертациялық жұмыстың басқа ғылыми-зерттеу жұмыстарымен байланысы

Диссертациялық жұмыстың мазмұны робототехника, басқару жүйелері және мехатрондық құрылғыларды жобалау салаларындағы қазіргі ғылыми зерттеулермен тікелей байланысты. Жұмыстың нәтижелері қашықтан басқару, интеллектуалды манипуляторлар және реабилитацияға арналған роботтық жүйелер бағытындағы зерттеулерді толықтыра алады.

Зерттеу жұмысының нәтижелерін апробациялау

Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері мен ережелері келесі халықаралық және республикалық ғылыми-техникалық конференцияларда баяндалды, сондай-ақ беделді ғылыми басылымдарда жарияланды:

Baigunchekov, Z., Cao, M., Li, Q., Amanov, B., Zhangabergen, D., Omarov, B., Rakhmatulla, Z., and Yeerzhati, M., Social Humanoid Robot Ai-Gerim., IEEE 20th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2025, DOI: 10.1109/ICIEA65512.2025.11148978

Baigunchekov Z., Carbone G., Zhumasheva Z., Amanov B., Zholdassov Y., Tolenov S., Tleukhanov A. Kinematics of the “Ai-Gerim” Robot Arm. Mechanisms and Machine Science Conference, 2022, DOI: 10.1007/978-3-031-04870-8_2

Ibrayev, S., Amanov, B., Enhancing Orthopedics and Sports Medicine with Lower Limb Exoskeleton Control in Rehabilitation Using Deep Learning-Based Electromyography Signal Classification. Retos, Open Access, 2024, Vol. 61, pp. 616–625.

Ibrayev, S., Omarov, B., Amanov, B., Momynkulov, Z., Development of a Deep Learning-Enhanced Lower-Limb Exoskeleton Using Electromyography Data for Post-Neurovascular Rehabilitation. Engineered Science, Open Access, 2024, Vol. 31, p. 1269.

Автордың жеке үлесі

Диссертацияда келтірілген негізгі ғылыми нәтижелер, теориялық тұжырымдар, математикалық модельдер, траекторияны жоспарлау мен басқару алгоритмдерінің негіздемесі автордың тікелей жеке зерттеулері негізінде алынған. Автор ғылыми әдебиеттерге талдау жүргізді, робот қолының кинематикалық және динамикалық модельдерін құрды, forward dynamics және inverse dynamics есептерін MATLAB ортасында сандық түрде жүзеге асырды, SolidWorks негізінде прототип параметрлерін анықтады және алынған нәтижелерді жүйеледі.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі

Диссертация кіріспеден, негізгі тараулардан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады. Жұмыста зерттеу тақырыбының өзектілігі, мақсаты мен міндеттері, зерттеу әдістері, ғылыми жаңалығы, теориялық және практикалық маңызы, қорғауға шығарылатын нәтижелері және алынған қорытындылар жүйелі түрде баяндалған.

Диссертацияның негізгі мазмұны

Диссертация кіріспеден, төрт негізгі тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады.

Кіріспеде зерттеу тақырыбының өзектілігі негізделіп, жұмыстың мақсаты мен міндеттері, зерттеу нысаны мен пәні, ғылыми жаңалығы және практикалық маңызы

айқындалған. Жұмыстың негізгі мақсаты ретінде қашықтан басқару және реабилитацияға арналған екі мақсатты 6-DOF гуманоид робот қолының модельдерін құру, траекторияны жоспарлау әдістерін таңдау және сәйкес басқару жүйелерін әзірлеу қойылған.

Бірінші тарауда гуманоид робот қолдардың даму бағыттары, олардың өндірістік, медициналық, сервистік және қашықтан басқару салаларындағы қолданылуы талданған. Сонымен қатар реабилитациялық робототехника, телеоперация және адам–робот өзара әрекеттесуіне қатысты негізгі ғылыми еңбектерге шолу жасалып, дәл қозғалыс пен қауіпсіз күштік өзара әрекеттесуді бір жүйеде біріктіру қажеттігі негізделген.

Екінші тарауда 6-DOF гуманоид робот қолының кинематикалық және динамикалық модельдері құрылған. Денавит–Хартенберг параметрлері негізінде тура және кері кинематика есептері шығарылып, жұмыс кеңістігі, сингулярлық конфигурациялар және Якобиан матрицасы талданған. Сондай-ақ Эйлер–Лагранж формализмі арқылы толық динамикалық теңдеулер алынып, робот қолының массалық-инерциялық параметрлері SolidWorks ортасында анықталған.

Үшінші тарауда робот қол үшін траекторияны жоспарлау әдістері қарастырылған. Сызықтық интерполяция, кубтық және бесінші дәрежелі полиномдар, PTP, LIN және адаптивті траекторияны жоспарлау тәсілдері салыстырылып, олардың қозғалыс тегістігі мен қолданылу ерекшеліктері талданған. Қорытындысында қашықтан басқару үшін PTP және LIN әдістерінің үйлесімі, ал реабилитацияға арналған міндеттер үшін адаптивті траекторияны жоспарлау қолайлы екені көрсетілген.

Төртінші тарауда робот қолдың басқару жүйелері зерттелген. Бос кеңістіктегі дәл қозғалыс үшін есептелген моментті басқару әдісі, ал адаммен және ортамен қауіпсіз өзара әрекеттесу үшін импеданстық басқару әдісі негізделген. Бұл тарауда басқару заңдарының математикалық моделі, қателік динамикасы, тұрақтылық шарттары және реабилитациялық әрі телеоперациялық режимдерге арналған параметрлерді таңдау қағидалары қарастырылған.

Қорытындыда қашықтан басқару және реабилитацияға арналған екі мақсатты 6-DOF гуманоид робот қолының математикалық, алгоритмдік және қолданбалы негіздері әзірленгені, ал ұсынылған траекторияны жоспарлау және басқару әдістері робот қолдың дәл қозғалысын, бағытталған әрекетін және қауіпсіз физикалық өзара әрекеттесуін қамтамасыз ететіні жинақталып көрсетілген.