АҢДАТПА

8D07101 – «Автоматтандыру және басқару» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін диссертациясы

ТОЛЫКБАЕВА МАРАЛ БАКЫТКАНОВНА

РОБОТ-МАНИПУЛЯТОРДЫ БЕЙІМДІ БАСҚАРУ

Зерттеудің негізгі идеясы. Диссертация тізбекті робот-манипулятор динамикасының геометриялық моделіне сүйене отырып, оның траекториялық қозғалысын бейімді басқару әдісін әзірлеуге арналған. Зерттеу манипулятор параметрлері белгісіз және жүйеге сыртқы ұйытқулар әсер ететін жағдайларда берілген траекторияны қадағалау дәлдігін арттыруға бағытталған.

Жұмыста келесі ғылыми шешімдер ұсынылған және негізделген:

1. Тізбекті манипулятор динамикасының геометриялық моделі. Бұл модельде кинетикалық энергия конфигурациялар кеңістігінің метрикасын анықтайды, ал координаталарға тәуелсіз қозғалыс теңдеуі ковариантты үдеуді жетектердің айналдыру моменттерімен байланыстырады.

2. Динамиканың геометриялық теңдеуін кері байланыс арқылы дәл сызықтандыруға негізделген траекториялық басқару әдісі.

3. Робасты түзету коэффициенттерін әр буын үшін жеке баптайтын бейімді-робасты алгоритм.

Әзірленген әдістер MATLAB/Simulink ортасында екі буынды жазық манипулятор моделінде зерттелді. Параметрлік белгісіздік пен сыртқы ұйытқулар ескерілген режимдерде әр буындағы коэффициентті бейімдеп баптау нәтижесінде қадағалау қатесінің орташа квадраттық мәні тұрақты коэффициенттермен робасты түзету қолданылғандағыдан төмен болды.

Түйін сөздер: робот-манипулятор, бейімді басқару, робасты басқару, траекториялық басқару, сызықтық емес динамикалық жүйелер, басқарудың геометриялық әдістері, дифференциалдық геометрия, Риман көпбейнелігі, конфигурациялар кеңістігі, метрикалық тензор, кері байланыс арқылы сызықтандыру, есептелетін моменттер әдісі.

Өзектілігі. Материалдарды роботпен өңдеу кезінде операцияның сапасы жұмыс құралының берілген траекториямен қаншалықты дәл қозғалатынына байланысты. Тізбекті манипуляторда мұндай дәлдікке жету үшін барлық буынның қозғалысы өзара үйлесуі қажет. Жетек моменттерін басқару буындардың бір-біріне әсерін ескеруге мүмкіндік береді. Қозғалыс теңдеулерінің сызықтық еместігі және манипулятордың инерциялық сипаттамаларының оның ағымдағы конфигурациясына тәуелділігі қажетті моменттерді есептеуді қиындатады.

Ли топтары мен Ли алгебралары теориясының әдістері буындардың орналасуы мен жылдамдықтарын жалпыланған координаталар және буындардағы жылдамдықтар арқылы өрнектеуге мүмкіндік береді. Осы

кинематикалық қатынастар манипулятордың кинетикалық энергиясын есептеуге негіз болады. Кинетикалық энергияға сәйкес квадраттық форма оң анықталған болса, кинетикалық энергия конфигурациялар кеңістігінде Риман метрикасын анықтайды. Бұл метрика қозғалыс теңдеуін координаталарға тәуелсіз түрде жазуға мүмкіндік береді.

Қозғалыстың геометриялық теңдеуі жетек моменттерін басқару заңын құруға негіз болады. Параметрлер дәл белгілі және сыртқы ұйытқулар жоқ кезде кері байланыс арқылы сызықтандыру қадағалау қатесінің сызықтық динамикасын беруге мүмкіндік береді. Іс жүзінде инерциялық параметрлердің дәл анықталмауы, пайдалы жүктің өзгеруі және сыртқы ұйытқулар қадағалау дәлдігін төмендетеді. Сондықтан қозғалыс барысында әр буынның түзету коэффициентін жеке баптайтын бейімді-робасты алгоритм әзірлеу өзекті.

Диссертация Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті (ҚР ҒЖБМ ҒК) бөлген гранттық қаржыландыруымен орындалған екі ғылыми жоба аясында әзірленді. AP19679327 «Мобильді роботтарды автоматты басқару және инерциялық навигациялау есептеріндегі машиналық оқыту әдістері» жобасы «Ақпараттық, коммуникациялық және ғарыштық технологиялар» басым бағытының «Зияткерлік роботтық жүйелер» бағыты бойынша жүзеге асырылды. Екінші жоба – AP13068317 «3D-сканерлеу және жабындарды аддитивті микроплазмалық бүрку технологиялары үшін робот-манипуляторды басқарудың жаңа алгоритмдерін әзірлеу».

Зерттеу объектісі – айналмалы буындары бар жетектердің айналдыру моменттері арқылы басқарылатын тізбекті манипулятор.

Зерттеу пәні – тізбекті робот-манипуляторлар динамикасының математикалық модельдері, олардың конфигурациялар кеңістігінің геометриялық қасиеттері, сызықтық емес динамикалық жүйелерді дәл сызықтандыру әдістері, сондай-ақ параметрлік белгісіздік жағдайында манипуляторларды бейімді траекториялық басқару әдістері мен алгоритмдері.

Зерттеу мақсаты – тізбекті робот-манипулятордың динамикасын математикалық модельдеу мен дәл сызықтандырудың геометриялық тұрғыдан негізделген әдістерін зерттеу және солардың негізінде басқару объектісінің динамикалық параметрлері белгісіз болғанда берілген қозғалыс траекторияларын қадағалауды қамтамасыз ететін бейімді траекториялық басқару жүйесін құру.

Зерттеу міндеттері:

1. Тізбекті робот-манипуляторлардың динамикасын математикалық модельдеудің, сызықтық емес жүйелерді дәл сызықтандырудың және бейімді траекториялық басқарудың қолданыстағы әдістерін талдап, олардың ерекшеліктерін, артықшылықтары мен шектеулерін анықтау.

2. Манипулятор буындарының конфигурациялары мен жылдамдықтарын анықтау үшін Ли топтары мен Ли алгебраларын пайдаланып, тізбекті робот-манипулятор кинематикасының геометриялық сипаттамасын әзірлеу.

3. Манипулятордың конфигурациялар кеңістігін метрикасы кинетикалық энергиямен анықталатын Риман көпбейнелігі ретінде сипаттау және метрикалық тензорды буындардың геометриялық әрі инерциялық сипаттамалары бойынша есептеуге арналған аналитикалық өрнектерді шығару.

4. Конфигурациялар кеңістігінің геометриялық құрылымын және әсер ететін басқарушы моменттерді ескере отырып, Риман көпбейнелігінде тізбекті робот-манипулятордың динамикалық моделін құру.

5. Тізбекті манипулятордың динамика теңдеулерін жалпыланған координаталар мен жылдамдықтар бойынша кері байланыс арқылы дәл сызықтандыру рәсімін әзірлеу және оның негізінде траекториялық басқару жүйесін құру.

6. Тізбекті робот-манипулятордың сызықтық емес динамикасын кері байланыс арқылы сызықтандыру негізінде бейімді траекториялық басқару жүйесін әзірлеу. Басқару объектісінің динамикалық параметрлері белгісіз болғанда жүйенің орнықтылық шарттары мен қадағалау қатесінің қасиеттерін зерттеу.

7. Әзірленген басқару алгоритмдерін компьютерде модельдеу, берілген траекторияларды қадағалау дәлдігін және динамикалық параметрлер белгісіздігі мен сыртқы ұйытқулардың басқару сапасына әсерін зерттеу, алынған нәтижелерді салыстыру.

Негізгі зерттеу әдістері: автоматты басқару теориясының, Ли топтары мен Ли алгебралары теориясының, аналитикалық механика мен Риман геометриясының әдістері, Ляпунов әдісі, MATLAB/Simulink ортасында компьютерлік модельдеу.

Қорғауға ұсынылатын ғылыми тұжырымдар:

1. Тізбекті манипулятордың конфигурациялар кеңістігін метрикасы кинетикалық энергиямен анықталатын Риман көпбейнелігі ретінде сипаттауға негізделген манипулятор динамикасының геометриялық моделі.

2. Тізбекті манипулятордың сызықтық емес динамикасын кері байланыс арқылы дәл сызықтандыруға негізделген траекториялық басқару әдісі.

3. Тізбекті манипуляторды траекториялық басқарудың дәл сызықтандыру мен бейімделген робасты түзетуге негізделген бейімді-робасты алгоритмі. Оның параметрлік белгісіздік пен сыртқы ұйытқулар жағдайындағы тиімділігі компьютерлік модельдеу арқылы расталды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы

Тізбекті манипулятор динамикасының Риман көпбейнелігіндегі моделі ұсынылды. Манипулятордың конфигурациялар кеңістігі метрика берілген тегіс көпбейнелік ретінде қарастырылады. Физикалық тұрғыдан бұл метрика манипулятордың кинетикалық энергия тензоры ретінде түсіндіріледі. Манипулятордың динамика теңдеуі Риман көпбейнелігінде ковариантты дифференциалдау арқылы алғаш рет координаталарға тәуелсіз түрде жазылды. Әзірленген модель аясында жалпыланған жылдамдықтар, күштер мен импульстер алғаш рет бірыңғай векторлық түрде өрнектелді. Жалпыланған жылдамдық жанама кеңістіктің векторы болады. Метрика арқылы жалпыланған

күштер мен импульстердің ковекторларына сол жанама кеңістіктің векторлары сәйкестендіріледі. Осы түрде жазылған манипулятордың динамика теңдеуі материалдық нүкте үшін Ньютонның екінші заңына формалды түрде ұқсас.

Тізбекті манипулятордың Риман көпбейнелігінде геометриялық түрде жазылған динамика теңдеулерін дәл сызықтандырудың өзіндік рәсімі ұсынылды. Ол манипулятордың жалпыланған координаталары мен жылдамдықтары бойынша кері байланыс арқылы жүзеге асырылады.

Динамиканың геометриялық теңдеулерін дәл сызықтандыруға және робасты түзету коэффициенттерін әр топса үшін бейімдеп баптауға негізделген тізбекті манипуляторды бейімді-робасты траекториялық басқарудың жаңа әдісі әзірленді.

Жарияланымдар. Диссертациялық зерттеу тақырыбы бойынша **8** ғылыми мақала жарияланды. Оның ішінде **1** мақала Scopus (Q1 квартилі) және Web of Science Core Collection (Q2 квартилі) дерекқорларында индекстелетін халықаралық рецензияланатын ғылыми журналда, **4** мақала ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ғылыми басылымдарда, **3** еңбек халықаралық ғылыми конференциялардың материалдарында жарияланды. Сонымен қатар ЭЕМ-ге арналған бағдарламаны авторлық құқық объектісі ретінде мемлекеттік тіркеу туралы **1** куәлік алынды.

Диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері келесі халықаралық ғылыми-техникалық конференцияда баяндалып, талқыланды:

1. «Қазақстанның инновациялық дамуына жастардың шығармашылығы» атты студенттердің, магистранттардың және жас ғалымдардың VIII халықаралық ғылыми-техникалық конференциясы, 2022 жылғы сәуір, Өскемен, Қазақстан.

2. 18th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2023), 2023 жылғы 16 қараша, Секешфехервар, Мажарстан.

3. Қаныш Сәтбаевтың туғанына 125 жыл толуына арналған «Қазақстанның инновациялық дамуына жастардың шығармашылығы» атты студенттердің, магистранттардың және жас ғалымдардың X халықаралық ғылыми-техникалық конференциясы, 2024 жылғы сәуір, Өскемен, Қазақстан.

Диссертацияда, сондай-ақ зерттеу тақырыбы бойынша жарияланған мақалаларда дәлелденген негізгі ғылыми тұжырымдар:

1. Тізбекті манипулятордың координаталарға тәуелсіз динамика теңдеуі алынды. Буындардың кинематикалық және инерциялық сипаттамалары бойынша есептелген метрикалық тензор ковариантты үдеуді жетектердің жалпыланған моменттерімен байланыстырады.

2. Қозғалыстың геометриялық теңдеуінен жетек моменттерін басқару заңы шығарылды. Модель дәл және сыртқы ұйытқулар жоқ жағдайда барлық топсалары жетекпен жабдықталған манипулятордың қалып пен жылдамдық бойынша қадағалау қателерінің нөлге экспоненциалды жинақталатыны негізделді.

3. Робасты түзетудің күшейту коэффициентін әр топса үшін бейімдеп баптау заңы әзірленді. Баптау кезінде орны мен жылдамдығы бойынша

қателердің берілген рұқсат шектеріне қатысты мәндері, сондай-ақ Ляпунов функциясының тиісті құраушысының уақыт бойынша нақты және тірек туындыларының арақатынасы ескеріледі.

Диссертацияның практикалық маңызы. Зерттеу нәтижелері Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің 7М07101 – «Автоматтандыру және басқару» білім беру бағдарламасы бойынша оқу процесіне енгізілді және «Технологиялық процестердің параметрлерін болжаудың бейімді әдістері» пәнін оқытуда қолданылады. Бұл 2024 жылғы 28 ақпандағы ғылыми-зерттеу жұмысын оқу процесіне енгізу туралы актімен расталған.

Практикаға енгізу үшін авторлық құқықпен қорғалатын объектілерге құқықтардың мемлекеттік тізілімге мәліметтерді енгізу туралы 2023 жылғы 21 тамыздағы № 38548 куәлікпен расталатын ЭЕМ-ге арналған бағдарлама ұсынылады. Авторлары А.Т. Кадыролдина, Ә.Т. Құсайын-Мұрат және **М.Б. Толыкбаева.**

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, 4 бөлімнен, қорытындыдан, 73 атаудан құралған пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Диссертация компьютерлік мәтіннің 132 бетінде баяндалған, 53 сурет, 11 кесте және 2 қосымшаны қамтиды.

Кіріспеде тақырыптың өзектілігі негізделіп, зерттеудің мақсаты мен міндеттері айқындалған. Жұмыстың ғылыми жаңалығы мен практикалық маңызы ашылып, қорғауға ұсынылатын ғылыми тұжырымдар берілген. Бірінші бөлімде манипуляторлар динамикасын сипаттаудың және олардың қозғалысын басқарудың қолданыстағы тәсілдері қарастырылды. Дәл сызықтандыруға және бейімді траекториялық басқаруға ерекше көңіл бөлінді. Екінші бөлімде кинетикалық энергия арқылы конфигурациялар кеңістігінің Риман метрикасы құрылып, координаталарға тәуелсіз қозғалыс теңдеуі алынды. Осылайша манипулятор динамикасының геометриялық моделі туралы бірінші ғылыми тұжырым негізделді. Үшінші бөлімде алынған қозғалыс теңдеуінен жетек моменттерін басқару заңы шығарылды. Манипулятор динамикасын жалпыланған координаталар мен жылдамдықтар бойынша кері байланыс арқылы дәл сызықтандыру туралы екінші ғылыми тұжырым негізделді. Төртінші бөлімде басқару заңы күшейту коэффициенті әр топса үшін жеке бапталатын робасты түзетумен толықтырылды. Екі буынды манипуляторды модельдеу нәтижелері әзірленген алгоритмнің параметрлік белгісіздік пен сыртқы ұйытқулар жағдайындағы тиімділігі туралы үшінші ғылыми тұжырымды растады. Қорытындыда негізгі тұжырымдар жасалып, диссертация тақырыбы бойынша жарияланымдар мен зерттеу нәтижелерін енгізу туралы мәліметтер берілді.