АҢДАТПА

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

ОРАЗОВА АРАЙЛЫМ ЖАНБОЛАТКЫЗЫ

КӨП БУЫНДЫ РОБОТ-МАНИПУЛЯТОРДЫ БАСҚАРУ ҮШІН СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ӘДІСТЕРДІ ҚОЛДАНУ

Зерттеудің негізгі идеясы. Диссертациялық жұмыс параметрлердің анықталмағандығы және сыртқы ауытқытушы әсерлер жағдайында тізбекті робот-манипуляторды траектория бойынша басқарудың сызықтық емес әдісін әзірлеуге арналған. Зерттеу дифференциалдық жазықтық теориясын, динамиканың геометриялық сипаттамасын және есептелетін моменттер әдісінің робасты түзету тәсілін біріктіреді. Бұл тәсіл басқару объектісінің номиналды және нақты модельдері арасындағы айырмашылық жағдайында траекторияны қадағалау дәлдігін арттыруға бағытталған және А типті дифференциалдық жазық жүйелер ұғымына негізделеді. Мұндай жүйелерде жазық шығыс тек күй айнымалыларына тәуелді болады. Моменттік басқаруы бар, барлық буындары жетектермен жабдықталған тізбекті робот-манипулятор осы типтегі жүйе ретінде қарастырылады. Бұл траектория бойынша басқару міндетін шешу үшін есептелетін моменттердің жалпыланған әдісін қолдануды негіздеуге мүмкіндік береді.

Жұмыста келесі ғылыми шешімдер ұсынылған және негізделген:

- күштік басқаруы бар тізбекті манипуляторды А типті дифференциалдық жазық жүйе ретінде сипаттау және есептелетін моменттер әдісін жалпылау;
- кинетикалық энергия метрикасына негізделген динамиканың геометриялық сипаттамасы және статикалық кері байланыс арқылы динамиканы сызықтандыру;
- математикалық модельдің анықталмағандықтары мен сыртқы әсерлердің ықпалын өтейтін траектория бойынша басқарудың сызықтық емес робасты заңы.

Әзірленген ғылыми қағидалар аналитикалық тұрғыдан зерттеліп, екі буынды манипуляторды компьютерлік модельдеу арқылы тексерілді. Траекторияны қадағалау дәлдігі мен басқарушы моменттер бойынша классикалық есептелетін моменттер әдісі және ұсынылған робасты басқару заңы салыстырылды.

Түйін сөздер: көпбуынды тізбекті робот-манипулятор, сызықтық емес басқару, есептелетін моменттер әдісі, дифференциалдық жазықтық, геометриялық динамика, кері байланыс арқылы сызықтандыру, робасты басқару.

Зерттеудің өзектілігі. Робот-манипуляторларды қолдану аясының кеңеюі берілген траекторияларды дәл орындауға, қозғалыс жылдамдығына және жұмыс жағдайларының өзгеруіне төзімділікке қойылатын талаптардың артуымен қатар жүреді. Тізбекті манипулятордың динамикасы сызықтық емес және өзара

байланысқан жүйе болып табылады: әрбір буынның қозғалысы басқа буындарға әсер етеді, ал инерциялық, Кориолис, центрден тепкіш және гравитациялық құраушылар манипулятордың конфигурациясы мен қозғалыс жылдамдығына тәуелді болады.

Есептелетін моменттер әдісі сызықтық емес құраушылардың әсерін өтеуге және қателіктің берілген динамикасын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Алайда оның тиімділігі математикалық модельдің дәлдігіне тәуелді. Массалар мен инерция моменттерінің анықталмағандығы, ескерілмеген үйкеліс, сыртқы әсерлер және пайдалы жүктеменің өзгеруі сызықтық емес құраушыларды өтеу дәлдігін төмендетіп, траекторияны қадағалау сапасын нашарлатады. Сондықтан дәл сызықтандырудың артықшылықтарын қалдық анықталмағандықтардың әсерін басу механизмімен үйлестіру қажет.

Дифференциалдық жазықтық теориясы жүйенің күйі мен басқарушы әсерлердің берілген траекториямен байланысын анықтауға мүмкіндік береді, ал геометриялық сипаттама динамиканы конфигурациялық кеңістіктің метрикасымен байланыстырады. Осы тәсілдерді бірлесіп пайдалану басқару жүйесінің құрылымын негіздеуге және оның робастылығын арттыру шарттарын тұжырымдауға мүмкіндік береді. Тиісті сызықтық емес басқару заңын әзірлеу және оның тиімділігін тексеру өзекті ғылыми міндет болып табылады.

Диссертациялық жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің гранттық қаржыландыруымен жүзеге асырылған екі жоба шеңберінде орындалды: № AP19679327 «Мобильді роботтарды автоматты басқару және инерциялық навигациялау міндеттеріндегі машиналық оқыту әдістері» жобасы «Ақпараттық, коммуникациялық және ғарыштық технологиялар» басым бағытының «Зияткерлік робототехникалық жүйелер» кіші басымдығы бойынша және № AP13068317 «3D-сканерлеу және жабындарды аддитивті микроплазмалық бүрку технологияларына арналған робот-манипуляторды басқарудың жаңа алгоритмдерін әзірлеу» жобасы.

Зерттеу объектісі– күштік басқаруы бар, сызықтық емес басқарылатын жүйе ретінде қарастырылатын көпбуынды тізбекті робот-манипулятор.

Зерттеу пәні – көпбуынды робот-манипуляторды траектория бойынша басқарудың математикалық модельдері, кері байланыс арқылы сызықтандыру әдістері және сызықтық емес робасты алгоритмдері.

Зерттеудің мақсаты: параметрлік анықталмағандықтар, математикалық модельдің қателіктері және сыртқы ауытқытушы әсерлер жағдайында жүйенің дәлдігі мен робастылығын арттыруды қамтамасыз ететін көпбуынды робот-манипуляторды траектория бойынша басқарудың сызықтық емес әдісін әзірлеу және зерттеу.

Зерттеудің міндеттері:

1. Манипуляторларды басқарудың заманауи әдістерін, оның ішінде кері байланыс арқылы сызықтандыруды, есептелетін моменттер әдісін және робасты басқаруды талдау.

2. Буындардың өзара әсерін, инерциялық, Кориолис, центрден тепкіш және гравитациялық құраушыларды ескере отырып, тізбекті манипулятор динамикасының математикалық моделін әзірлеу.

3. Манипуляторды ерекше типтегі дифференциалдық жазық жүйе ретінде зерттеу және оның жазық шығысын анықтау.

4. Есептелетін моменттер әдісінің қарастырылатын дифференциалдық жазық жүйелерді траектория бойынша басқарудың жалпы әдісімен байланысын анықтау.

5. Конфигурациялық кеңістіктің метрикасы мен ковариантты туындыны пайдалана отырып, манипулятор динамикасын дифференциалдық геометрия әдістерімен сипаттау.

6. Кері байланыс арқылы сызықтандыру шарттарын және баламалы сызықтық жүйенің құрылымын анықтау.

7. Параметрлік анықталмағандықтардың, модель қателіктерінің және сыртқы ауытқытушы әсерлердің классикалық есептелетін моменттер әдісінің дәлдігіне ықпалын зерттеу.

8. Сызықтандырылған жүйені траектория бойынша басқарудың сызықтық емес робасты заңын синтездеу.

9. Тұйық басқару жүйесінің орнықтылығын негіздеу және траекторияны қадағалау қателігінің жинақталу шарттарын анықтау.

10. MATLAB/Simulink ортасында басқару әдістеріне компьютерлік зерттеу жүргізу, жүйенің дәлдігін, өтпелі процестерін және динамикалық сипаттамаларын бағалау.

11. Әзірленген робасты басқару заңын классикалық есептелетін моменттер әдісімен дәлдік, орнықтылық және робастылық көрсеткіштері бойынша салыстыру.

Зерттеудің негізгі әдістері: автоматты басқару теориясының, математикалық модельдеудің, дифференциалдық геометрияның, дифференциалдық жазықтық теориясының және кері байланыс арқылы сызықтандырудың әдістері. Жүйенің орнықтылығы Ляпуновтың тура әдісімен, ал ауытқытушы әсерлерге сезімталдығы жиіліктік әдістермен зерттелді. Компьютерлік зерттеулер MATLAB/Simulink ортасында динамика теңдеулерін сандық интегралдау және алынған нәтижелерді аналитикалық шешімдермен салыстыру арқылы жүргізілді.

Қорғауға ұсынылатын негізгі ғылыми тұжырымдар:

1. Тізбекті робот-манипуляторды ерекше типтегі дифференциалдық жазық басқару жүйесі ретінде қарастыру; есептелетін моменттердің жалпыланған әдісі және манипуляторды басқару жүйесін сызықтандыру.

2. Манипулятор динамикасының геометриялық түсіндірмесі және статикалық кері байланыс арқылы сызықтандыру.

3. Кері байланыс арқылы сызықтандыруға және математикалық модельдің анықталмағандықтарын өтеуге негізделген робот-манипуляторды траектория бойынша басқарудың сызықтық емес робасты заңы.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы төмендегілерден тұрады:

1. Күштік басқаруы бар көпбуынды тізбекті манипуляторды А типті дифференциалдық жазық жүйе ретінде сипаттауды сызықтық емес динамиканы сызықтандыру және траектория бойынша басқару жүйесін құру үшін қолдану негізделді.

2. Классикалық есептелетін моменттер әдісінің А типті дифференциалдық жазық жүйелерді траектория бойынша басқарудың жалпы әдісінің дербес жағдайы екендігі анықталды.

3. Параметрлік анықталмағандықтарды, модель қателіктерін және сыртқы ауытқытушы әсерлерді ескеретін көпбуынды манипулятордың сызықтандырылған динамикасын басқарудың сызықтық емес робасты заңы әзірленді.

4. Қабылданған болжамдарды ескере отырып, әзірленген басқару заңын қолдану кезінде тұйық жүйенің орнықтылығы мен траекторияны қадағалау қателігінің жинақталу шарттары алынды.

Зерттеудің негізгі ғылыми нәтижелері:

1. Модель параметрлері дәл белгілі болған жағдайда барлық буындары жетектермен жабдықталған манипулятордың сызықтық емес динамикасын тәуелсіз қос интеграторлар жүйесіне түрлендіру зерттелді. Есептелетін моменттердің жалпыланған әдісінің құрылымы негізделіп, өтпелі процестер және қателіктің аддитивті ауытқытушы әсерлерге сезімталдығы зерттелді. Аналитикалық амплитудалық-жиіліктік сипаттамалардың компьютерлік модельдеу нәтижелерімен сәйкестігі анықталды.

2. Екі буынды манипулятор моделінің геометриялық сипаттамалары, оның ішінде Кристоффель символдары мен Гаусс қисықтығы алынды. Потенциалдық энергия тұрақты және басқарушы моменттер болмаған жағдайда еркін қозғалыс геодезиялық қозғалыс ретінде түсіндірілді. Сандық тексеру классикалық және геометриялық сипаттамалардың сәйкестігін көрсетті: басқарылатын қозғалыс кезіндегі траекториялардың айырмашылығы $1{,}8\cdot10^{-11}$ рад, ал сызықтандыруды тексеру кезінде $1{,}0\cdot10^{-11}$ рад құрады.

3. Модель параметрлері дәл болмаған және ескерілмеген үйкеліс жағдайында робасты түзетудің тиімділігі расталды. Сыртқы моменттің 3 Н·м импульстік әсері және екінші буын массасының 0,5 кг-ға ұлғаюы жеке зерттелді. Қарастырылған режимдерде траекторияны қадағалау қателіктері классикалық есептелетін моменттер әдісімен салыстырғанда 37–50 есе азайды. Импульстік әсер кезінде буындардың максималды қателіктері тиісінше 0,160 және 0,525 рад мәндерінен 0,0043 және 0,0142 рад мәндеріне дейін төмендеді, бұл ретте жетектердің ең жоғары моменттері салыстырмалы деңгейде сақталды.

Модельдің массалары мен инерция моменттерін ±40 % шегінде өзгерткен кезде робасты жүйенің қателік нормасының максималды мәні 0,0018–0,0058 рад, ал классикалық басқару кезінде 0,08–0,29 рад құрады. Робасты түзету коэффициентінің күшеюі мен шекаралық қабат енінің траекторияны қадағалау дәлдігіне және басқарушы моменттердің бірқалыптылығына әсері көрсетілді.

Алынған нәтижелер компьютерлік модельдеудің қарастырылған режимдерін сипаттайды.

Жарияланымдар. Диссертациялық жұмыс тақырыбы бойынша 8 ғылыми еңбек жарияланды, оның ішінде Scopus және Web of Science Core Collection дерекқорларында индекстелетін халықаралық рецензияланатын ғылыми журналдарда 2 мақала жарияланды: Sensors (2025 ж., Scopus бойынша Q1, WoS бойынша Q2 квартиль, JCR 2025) және Siberian Electronic Mathematical Reports (2025 ж., WoS бойынша Q3 квартиль, JCR 2024); Қазақстан Республикасының ғылым және жоғары білім саласындағы уәкілетті органы ұсынған ғылыми басылымдарда 3 мақала; халықаралық ғылыми конференция материалдарында 3 жарияланым жарық көрді.

Зерттеу нәтижелерін апробациялау. Диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері төмендегі үш халықаралық конференцияда баяндалып, талқыланды:

1. VIII «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана» халықаралық ғылыми-техникалық конференциясы, 2022 жылғы 7–8 сәуір, Өскемен қ., Қазақстан;
2. 18th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2023), 2023 жылғы 16 қараша, Секешфехервар қ., Венгрия;
3. Қаныш Сәтбаевтың 125 жылдығына арналған X «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана» халықаралық ғылыми-техникалық конференциясы, 2024 жылғы 11–12 сәуір, Өскемен қ., Қазақстан.

Практикалық маңыздылығы. Әзірленген модельдер мен алгоритмдер тізбекті робот-манипуляторларды траектория бойынша басқару жүйелерін жобалау, талдау және компьютерлік зерттеу кезінде қолданылуы мүмкін. Диссертациялық зерттеу нәтижелері Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің 6В07101 «Автоматтандыру және басқару» білім беру бағдарламасы бойынша оқу үдерісіне енгізіліп, «Автоматты реттеудің сызықтық емес жүйелері» пәнін оқыту барысында қолданылады (2024 жылғы 28 ақпандағы ғылыми-зерттеу жұмысының нәтижелерін оқу үдерісіне енгізу актісі).

Автордың жеке үлесі. Автордың жеке үлесі ғылыми мәселені қоюдан, зерттеудің мақсаты мен міндеттерін тұжырымдаудан, математикалық модельдер мен басқару әдістерін әзірлеуден, аналитикалық есептеулер мен компьютерлік эксперименттер жүргізуден, алынған нәтижелерді талдау және түсіндіруден, ғылыми жарияланымдарды дайындаудан, зерттеу нәтижелерін апробациялаудан және оларды практикаға енгізуден тұрады.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, төрт бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және А қосымшасынан тұрады. Жұмыс 151 бетте баяндалған, 81 сурет пен 7 кестені қамтиды. Пайдаланылған әдебиеттер тізімінде 92 дереккөз берілген.

Бөлімдерде көпбуынды манипуляторларды басқарудың заманауи әдістері, дифференциалдық жазықтық және есептелетін моменттердің жалпыланған әдісі, динамиканың геометриялық түсіндірмесі мен оны сызықтандыру, сондай-ақ сызықтық емес робасты траекториялық басқару және компьютерлік модельдеу нәтижелері бірізді түрде қарастырылады.