



КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ, ПРИБОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР, АСПАП ЖАСАУ ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ
COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND AUTOMATION

ӨОЖ 007.52:629.05

ГТАХА 50.43.17

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_42_3_14

С.Жәрдемқызы¹, М.К.Бактыбаев², Ш.А.Алимбай³, Г.К.Бердибаева³

¹ Satbayev University, Алматы, Казахстан

² Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Казахстан

*E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz

**МОБИЛЬДІ РОБОТТАНДЫРЫЛҒАН ПЛАТФОРМАНЫҢ ҚАУІПСІЗ
 НАВИГАЦИЯСЫН КӨПСЕНСОРЛЫ АҚПАРАТ НЕГІЗІНДЕ ЖЕТІЛДІРУ**

***Аңдатпа.** Бұл жұмыста көпсенсорлы ақпаратты біріктіру негізінде мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз автономды навигациясын жетілдіру әдісі ұсынылған. Зерттеудің мақсаты LiDAR, RGB камера, инерциялық өлшеу модулі (IMU) және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтерді біріктіру арқылы роботтың орналасуын сенімді бағалау және кедергілерді ескере отырып қауіпсіз қозғалыс траекториясын қалыптастыру болып табылады. Ұсынылған әдісте мобильді платформаның динамикалық моделі, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі, қоршаған ортаны бағалау, қауіпсіз траекторияны жоспарлау және нақты уақыт режиміндегі қозғалысты басқару модульдері бір жүйеге біріктірілді. Динамикалық модель роботтың қозғалыс параметрлерін, доңғалақтардың айналу жылдамдықтарын және басқару әсерлерін ескеруге мүмкіндік береді. Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру нәтижесінде роботтың ағымдағы орналасуы мен қозғалыс күйі бағаланып, алынған ақпарат траекторияны жоспарлау және басқару жүйесіне беріледі. Қауіпсіз траекторияны қалыптастыру кезінде робот пен кедергілер арасындағы минималды қашықтық ескеріліп, соқтығысу қаупін төмендететін қозғалыс бағыты анықталады. Әдістің тиімділігі MATLAB және ROS–Gazebo модельдеу орталарында бағаланды. Модельдеу барысында роботтың жоспарланған маршрут бойынша қозғалысы, статикалық кедергілерді анықтауы және оларды қауіпсіз айналып өтуі зерттелді. Сонымен қатар сенсорлық мәліметтерге сыртқы шу енгізіліп, ұсынылған тәсілдің өлшеу қателеріне төзімділігі бағаланды. Нәтижелер көпсенсорлы ақпаратты біріктіру роботтың орналасуын бағалау тұрақтылығын арттырып, траекторияны тұрақты бақылауды және қауіпсіз навигацияны қамтамасыз ететінін көрсетті. Ұсынылған әдіс өндірістік автоматтандыруда, қоймалық логистикада және сервистік робототехникада мобильді роботтардың автономды навигация жүйелерін әзірлеу үшін қолданылуы мүмкін.*

***Түйін сөздер:** мобильді роботтандырылған платформа, қауіпсіз навигация, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру, LiDAR, RGB камера, IMU, доңғалақ энкодері, динамикалық модель, траекторияны жоспарлау, ROS–Gazebo.*

Кіріспе.

Қазіргі уақытта мобильді роботтандырылған платформалар өндірістік автоматтандыру, логистика, ауыл шаруашылығы, денсаулық сақтау, қызмет көрсету және интеллектуалды көлік жүйелерінде кеңінен қолданылады. Мұндай жүйелердің тиімділігі олардың қоршаған ортаны дәл қабылдауына, өз орнын сенімді анықтауына және қозғалысты қауіпсіз ұйымдастыру қабілетіне тікелей байланысты. Сондықтан мобильді

роботтардың қауіпсіз навигациясын қамтамасыз ету робототехника саласындағы маңызды ғылыми бағыттардың бірі болып табылады. [1–3]

Сондықтан соңғы жылдары зерттеулерде LiDAR, RGB камера, инерциялық өлшеу блогы (IMU) және доңғалақ энкодерлері сияқты бірнеше сенсордан алынған ақпаратты біріктіру әдістеріне ерекше назар аударылуда. [4–6]

Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру қоршаған ортаның геометриялық құрылымын, роботтың ағымдағы күйін және қозғалыс параметрлерін бір уақытта бағалауға мүмкіндік береді. LiDAR кеңістіктегі кедергілердің нақты координаталарын анықтаса, камера қоршаған ортаның визуалды ерекшеліктерін сипаттайды. IMU роботтың үдеуі мен бұрыштық жылдамдығын өлшейді, ал энкодерлер орын ауыстыру туралы ақпарат береді. Осы сенсорлық мәліметтерді кешенді өңдеу локализация дәлдігін арттырып, мобильді роботтың қоршаған ортадағы орнын сенімді бағалауға және қауіпсіз навигацияны қамтамасыз етуге мүмкіндік береді [7–8].

Әдебиеттерге жүргізілген талдау қазіргі зерттеулерде көпсенсорлы ақпаратты біріктіру, траекторияны жоспарлау және кедергілерді айналып өту мәселелері кеңінен қарастырылатынын көрсетті. Алайда бұл бағыттардың көпшілігі жеке-жеке зерттелген, ал оларды бір навигациялық жүйеде кешенді біріктіру мәселесі жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Сонымен қатар сыртқы өлшеу қателіктерінің әсерін ескеру және ұсынылған әдістерді роботтық бағдарламалық ортада тексеру мәселелері әлі де өзекті болып қалып отыр [9–10].

Осыған байланысты көпсенсорлы ақпарат негізінде мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз навигациясын жетілдіру ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті мәселе болып табылады.

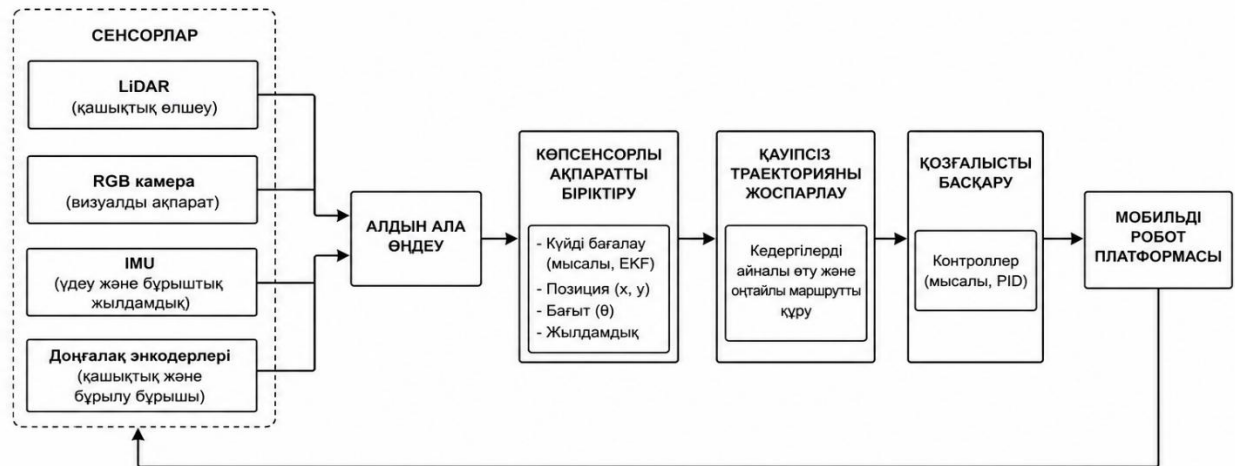
Зерттеудің ғылыми жаңалығы мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз навигациясын қамтамасыз ету үшін көпсенсорлы ақпаратты бейімделетін салмақ коэффициенттері негізінде біріктіруді, платформаның динамикалық моделін, қауіпсіз траекторияны жоспарлауды және қозғалысты басқаруды бірыңғай навигациялық жүйеде кешенді қолданудан тұрады. Қолданыстағы көпсенсорлы навигация тәсілдерінен айырмашылығы, ұсынылған әдісте LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған ақпараттың робот күйін бағалауға қосатын үлесі тұрақты салмақ коэффициенттерімен емес, сенсорлық өлшеулердің ағымдағы белгісіздігіне сәйкес бейімделетін коэффициенттер арқылы анықталады. Өлшеу дисперсиясы артқан жағдайда сәйкес сенсордың салмағы автоматты түрде төмендетіліп, сенімділігі жоғары ақпарат көздерінің үлесі артады. Алынған біріктірілген күй бағасы қауіпсіз траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне беріледі. Осылайша, ұсынылған тәсіл сенсорлық өлшеулердің белгісіздігі жағдайында робот күйін бағалау, қауіпсіз траекторияны қалыптастыру және қозғалысты басқару міндеттерін өзара байланысқан бірыңғай жүйеде шешуге мүмкіндік береді.

Осы жұмыстың мақсаты – LiDAR, RGB камера, IMU және энкодерлерден алынатын мәліметтерді біріктіру арқылы мобильді роботтандырылған платформаның қоршаған ортада қауіпсіз қозғалуын қамтамасыз ететін навигациялық әдісті әзірлеу. Ұсынылған тәсіл роботтың орналасуын дәлірек анықтауға, қауіпсіз траекторияны жоспарлауға және статикалық кедергілер жағдайында тұрақты қозғалысты қамтамасыз етуге бағытталған.

Зерттеу материалдары мен әдістері.

Мобильді роботтандырылған платформаның архитектурасы және динамикалық моделі.

Ұсынылған мобильді роботтандырылған платформаның архитектурасы көпсенсорлы ақпаратты жинау, алдын ала өңдеу, біріктіру, қауіпсіз траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдерінен тұрады. Барлық функционалдық модульдер өзара байланысып, роботтың қоршаған ортадағы өзгерістерге нақты уақыт режимінде бейімделуін қамтамасыз етеді. Жүйенің жалпы құрылымы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 – Мобильді роботтандырылған платформаның көпсенсорлы қауіпсіз навигация архитектурасы.

1-суретте ұсынылған навигациялық жүйенің негізгі құрылымы көрсетілген. LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер алдын ала өңделіп, көпсенсорлы біріктіру модуліне беріледі. Осы модульде роботтың ағымдағы күйі бағаланып, алынған параметрлер қауіпсіз траекторияны жоспарлау блогына жіберіледі. Қозғалысты басқару жүйесі жоспарланған траектория негізінде жетекші доңғалақтарға басқару командаларын қалыптастырады. Кері байланыс арнасы роботтың нақты күйін үздіксіз бақылауға және қозғалысты түзетуге мүмкіндік береді.

Роботтың аппараттық құрылымы қозғалыс жүйесінен, есептеу модулінен және бірнеше сенсорлардан тұрады. Қозғалыс жүйесі екі жетекші және бір тірек доңғалақтан құралған дифференциалды жетекті мобильді платформа негізінде орындалған. Мұндай құрылым басқарудың қарапайымдылығымен, жоғары маневрлігімен және өндірістік әрі қызмет көрсету салаларындағы мобильді роботтарда кеңінен қолданылуымен ерекшеленеді [11].

Платформаның қозғалысын дәлірек сипаттау үшін дифференциалды жетектің динамикалық моделі қарастырылды. Кинематикалық модель тек роботтың геометриялық қозғалысын сипаттайды, ал динамикалық модель платформаның массасын, инерция моментін, жетек күштерін және қозғалысқа кедергі әсерлерін ескеруге мүмкіндік береді. Роботтың бойлық қозғалысы келесі теңдеумен сипатталады:

$$m\dot{v} = F_R + F_L - F_{res} \quad (1)$$

мұндағы:

m – мобильді платформаның толық массасы;

v – платформаның сызықтық жылдамдығы;

F_R және F_L – оң және сол жетекші доңғалақтар тудыратын тарту күштері;

F_{res} – домалау кедергісі мен сыртқы әсерлерді сипаттайтын қорытқы кедергі күші.

Бұл теңдеу платформаның сызықтық үдеуінің жетекші доңғалақтардың тарту күштері мен қозғалысқа қарсы әсер ететін кедергі күшіне тәуелді екенін көрсетеді. Оң және сол

доңғалақтардағы тарту күштерінің айырмасы роботтың айналу қозғалысын қалыптастырады:

$$J\dot{\omega} = \frac{L}{2}(F_R - F_L) - M_{res} \quad (2)$$

мұндағы:

J – платформаның тік оське қатысты инерция моменті;

ω – бұрыштық жылдамдық;

L – жетекші доңғалақтар арасындағы қашықтық;

M_{res} – айналмалы қозғалысқа қарсы әсер ететін кедергі моменті.

Екінші теңдеу платформаның бұрыштық үдеуі оң және сол доңғалақтардың тарту күштерінің айырмасымен анықталатынын көрсетеді. Осылайша динамикалық модель масса, инерция және кедергі әсерлерін ескере отырып, робот қозғалысын модельдеуге және басқару алгоритмін тексеруге мүмкіндік береді.

Қоршаған орта туралы ақпаратты жинау үшін бірнеше түрлі сенсорлар қолданылады. LiDAR кеңістіктегі кедергілердің арақашықтығын жоғары дәлдікпен өлшейді және қоршаған ортаның геометриялық моделін қалыптастырады. RGB камера визуалды ақпаратты қабылдап, объектілерді анықтауға және олардың орналасуын бағалауға мүмкіндік береді. IMU сенсоры роботтың үдеуі мен бұрыштық жылдамдығын өлшей отырып қозғалыс динамикасын сипаттайды. Дөңгелек энкодерлері роботтың жүрген қашықтығы мен бұрылу бұрышын есептеу үшін пайдаланылады [12].

Барлық сенсорлардан алынған мәліметтер орталық есептеу модулінде өңделеді. Алдымен өлшеулер сүзгіден өткізіліп, уақыт бойынша синхрондалады және бірыңғай координаталар жүйесіне түрлендіріледі. Кейін көпсенсорлы біріктіру алгоритмі роботтың ағымдағы күйін бағалайды. Алынған күй параметрлері траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне беріледі.

Ұсынылған архитектураның негізгі ерекшелігі – әртүрлі сенсорлардың ақпараттарын, платформаның динамикалық моделін, траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдерін бір жүйеде біріктіру. Мұндай құрылым навигациялық ақпараттың сенімділігін арттырып, платформаның статикалық кедергілері бар ортада тұрақты және қауіпсіз қозғалуына мүмкіндік береді [13]. Көпсенсорлы мәліметтерді біріктіру әдісі келесі бөлімде қарастырылады.

Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру әдісі.

Мобильді роботтың қауіпсіз навигациясының тиімділігі қоршаған орта туралы алынатын ақпараттың дәлдігі мен сенімділігіне тікелей байланысты. Бір ғана сенсорды қолдану локализация қателігінің артуына және қоршаған ортаны толық бағалай алмауға әкелуі мүмкін. Ұсынылған жүйеде LiDAR кедергілердің геометриялық орналасуын анықтайды, RGB камера визуалды белгілерді қалыптастырады, IMU роботтың үдеуі мен бұрыштық жылдамдығын өлшейді, ал доңғалақ энкодерлері орын ауыстыру мен қозғалыс бағыты туралы мәлімет береді. Осы сенсорлардың ақпараттарын кешенді өңдеу олардың жеке кемшіліктерін өзара толықтырып, робот күйін бағалаудың сенімділігін арттырады.

Ұсынылған әдісте сенсорлық мәліметтер алдымен сүзгіден өткізіліп, уақыт бойынша синхрондалады және бірыңғай координаталар жүйесіне түрлендіріледі. Әрбір сенсор робот күйінің толық векторын тікелей қалыптастырмайтындықтан, бастапқы өлшеулер алдын ала өңдеу және координаталық түрлендіру кезеңдерінен кейін робот күйінің жеке бағасына келтіріледі. Кейін бұл бағалар өлшеу сенімділігіне сәйкес бейімделетін салмақ коэффициенттері арқылы біріктіріледі [14].

Көпсенсорлы жүйеде роботтың ағымдағы күйі күй векторы арқылы сипатталады.

$$X(k) = [x(k), y(k), \theta(k)]^T \quad (3)$$

мұндағы:

$x(k)$ – роботтың X осі бойынша координатасы;

$y(k)$ – роботтың Y осі бойынша координатасы;

$\theta(k)$ – роботтың бағыт бұрышы.

Алдын ала өңдеу нәтижесінде әрбір ақпарат көзі робот күйінің жеке бағасын қалыптастырады. Сенсорлық бағалар көпсенсорлы біріктіру алгоритмі арқылы қорытынды күй векторына біріктіріледі:

$$X_f(k) = \sum_{i=1}^n w_i(k) X_i(k) \quad (4)$$

мұндағы:

$X_i(k)$ – i -сенсор мәліметтері негізінде алынған робот күйінің жеке бағасы;

$w_i(k)$ – i -сенсордың сенімділік салмағы;

$X_f(k)$ – көпсенсорлы біріктіру нәтижесінде алынған роботтың қорытынды күйі.

Салмақ коэффициенттері сенсорлық өлшеулердің ағымдағы белгісіздігіне кері пропорционал түрде анықталады:

$$w_i(k) = [1/(\sigma_i^2(k) + \varepsilon)] / \left[\sum_{j=1}^n 1/(\sigma_j^2(k) + \varepsilon) \right] \quad (5)$$

мұндағы:

$\sigma_i^2(k)$ – i -сенсор өлшеулерінің ағымдағы дисперсиясы;

ε – бөлімнің нөлге тең болуын болдырмайтын кіші оң тұрақты шама.

Бұл өрнек сенсорлық өлшеулердің белгісіздігі артқан кезде сәйкес салмақ коэффициентінің төмендеуін қамтамасыз етеді. Салмақтар теріс мән қабылдамайды және олардың қосындысы бірге тең болады. Сондықтан шу деңгейі жоғары сенсордың қорытынды күй бағасына әсері автоматты түрде азаяды.

Сенсорлық өлшеулердің қателігін бағалау үшін әрбір ақпарат көзі бойынша өлшенген мән мен эталондық күй арасындағы қалдық есептеледі. i -ші сенсор үшін k -шы уақыт қадамындағы өлшеу қалдығы келесі түрде анықталады:

$$e_i(k) = z_i(k) - z_{ref}(k) \quad (6)$$

мұндағы:

$e_i(k)$ – i – ші сенсордың k -шы уақыт қадамындағы өлшеу қателігі;

$z_i(k)$ – сенсор арқылы алынған өлшеу мәні;

$z_{ref}(k)$ – модельдеу ортасында белгілі эталондық мән.

Өлшеу белгісіздігін сандық бағалау үшін соңғы N өлшеуден тұратын жылжымалы уақыт терезесіндегі қателік дисперсиясы есептеледі:

$$\sigma_i^2(k) = 1/(N-1) \sum_{j=k-n+1}^k [e_i(j) - \bar{e}_i(k)]^2 \quad (7)$$

мұндағы:

N – уақыт терезесіндегі өлшеулер саны;

$\bar{e}_i(k)$ – осы терезедегі орташа өлшеу қателігі;

$\sigma_i^2(k)$ – i -ші сенсор өлшеулерінің ағымдағы дисперсиясы. Дисперсияның жоғары мәні сенсорлық ақпараттың белгісіздігі артқанын көрсетеді.

Есептелген $\sigma^2(k)$ дисперсиясының мәні (5) формуласына сәйкес сенсордың салмақ коэффициентін анықтау үшін пайдаланылады. Осылайша, өлшеу қатесі артқан кезде дисперсия мәні ұлғайып, сәйкес сенсордың салмақ коэффициенті төмендейді. Керісінше, өлшеулері тұрақты сенсордың дисперсиясы төмен болып, оның біріктірілген күй бағасына қосатын үлесі артады. Салмақ коэффициенттері әрбір уақыт қадамында қайта есептеліп, сенсорлық ақпараттың ағымдағы сенімділігіне бейімделеді.

Сенсорлардың сенімділігі қозғалыс жағдайына байланысты өзгеріп отырады. Мысалы, жарықтың төмендеуі камера мәліметтерінің сапасын нашарлатуы, доңғалақтың сырғанауы энкодерлік одометрия қателігін арттыруы, ал діріл IMU өлшеулеріне қосымша шу енгізуі мүмкін. Мұндай жағдайда өлшеу дисперсиясы ұлғайып, (5) формуласына сәйкес сенсордың салмақ коэффициенті төмендейді. Нәтижесінде сенімділігі жоғары ақпарат көздерінің үлесі артып, робот күйін бағалауға сыртқы өлшеу қателіктерінің әсері азаяды [15].

Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі әрбір уақыт қадамында келесі ретпен орындалады. Алдымен LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер қабылданып, алдын ала сүзгіден өткізіледі және уақыт бойынша синхрондалады. Одан кейін сенсорлық мәліметтер бірыңғай координаталар жүйесіне түрлендіріліп, әрбір ақпарат көзі үшін өлшеу қателігі мен оның дисперсиясы есептеледі. Алынған дисперсия мәндері негізінде (5) формуласына сәйкес сенсорлардың салмақ коэффициенттері жаңартылады. Жеке сенсорлық бағалар осы коэффициенттер бойынша біріктіріліп, роботтың қорытынды күй векторы қалыптастырылады. Алынған күй бағасы қауіпсіз траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне беріледі.

Қауіпсіз траекторияны жоспарлау әдісі

Қауіпсіз траекторияны жоспарлау мобильді роботтың бастапқы күйінен мақсатты орынға дейін кедергілерді ескере отырып тиімді маршрут құру процесі болып табылады. Ұсынылған жоспарлау тәсілі ықтимал маршруттарды қозғалыс ұзындығы мен кедергілерден қауіпсіз қашықтық критерийлері бойынша бағалап, қауіпсіз қозғалыс бағытын қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Траекторияны жоспарлау роботтың бастапқы және мақсатты күйлерін анықтаудан басталады.

$$q_s = [x_s, y_s, \theta_s]^T \quad (8)$$

мұндағы:

- x_s – роботтың бастапқы X координатасы;
- y_s – роботтың бастапқы Y координатасы;
- θ_s – роботтың бастапқы бағыт бұрышы.

Мақсатты күй роботтың жоспарланған қозғалысының соңғы нүктесін сипаттайды және келесі түрде анықталады.

$$q_g = [x_g, y_g, \theta_g]^T \quad (9)$$

мұндағы:

- x_g – мақсатты X координатасы;
- y_g – мақсатты Y координатасы;
- θ_g – мақсатты бағыт бұрышы.

Бастапқы және мақсатты күйлер анықталғаннан кейін жоспарлау алгоритмі қауіпсіз траекторияны қалыптастырады. Ұсынылған жұмыста траекторияны жоспарлау роботтың ағымдағы орны, мақсатты күйі және қоршаған ортадағы кедергілер туралы ақпарат негізінде жүзеге асырылады. Нәтижесінде жоспарланған траектория робот бірізді өтетін күйлердің реттелген тізбегі ретінде қалыптасады.

$$P = \{q_1, q_2, \dots, q_N\} \quad (10)$$

мұндағы:

P – жоспарланған траектория;
 q_i – траекториядағы i -ші күй;
 N – жоспарланған күйлер саны.

Жоспарланған траектория роботтың қозғалыс бағытын ғана емес, сонымен қатар қозғалыс қауіпсіздігін қамтамасыз ететін аралық күйлердің ретін анықтайды. Әрбір күй келесі қозғалыс кезеңіне негіз болады және басқару жүйесіне роботтың жоспарланған бағытын дәл орындауға мүмкіндік береді.

Жоспарланған траектория уақыт функциясы түрінде келесі түрде беріледі.

$$q_d(t) = [x_d(t), y_d(t), \theta_d(t)]^T \quad (11)$$

мұндағы:

$x_d(t)$ – жоспарланған X координатасы;
 $y_d(t)$ – жоспарланған Y координатасы;
 $\theta_d(t)$ – жоспарланған бағыт бұрышы.

Қозғалыс барысында роботтың нақты күйі жоспарланған траекториямен үздіксіз салыстырылып отырады. Егер нақты қозғалыс жоспарланған бағыттан ауытқыса, басқару жүйесі қателікті азайту үшін түзету әсерін қалыптастырады. Мұндай тәсіл роботтың тұрақты қозғалысын қамтамасыз етеді.

$$e(k) = \sqrt{(x_d(k) - x(k))^2 + (y_d(k) - y(k))^2} \quad (12)$$

мұндағы:

$e(k)$ – жоспарланған және нақты орын арасындағы қателік.

Егер қозғалыс барысында жаңа кедергілер анықталса немесе қоршаған орта өзгерсе, траекторияны жоспарлау модулі маршрутты қайта есептейді. Нәтижесінде робот алдын ала берілген бағытқа тәуелді болмай, нақты уақыт режимінде қоршаған ортаға бейімделген қауіпсіз траекторияны қалыптастырады.

Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісі

Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісі мобильді роботтың динамикалық моделін, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмін және қауіпсіз траекторияны жоспарлау модулін бірыңғай басқару жүйесіне біріктіреді. Әдістің негізгі мақсаты – роботтың қоршаған ортадағы өзгерістерге бейімделуін қамтамасыз ете отырып, қозғалыстың қауіпсіздігі мен навигациялық дәлдігін арттыру. Басқару жүйесі сенсорлардан алынған ақпарат негізінде роботтың ағымдағы күйін бағалап, қауіпсіз маршрутты қалыптастырады және қажет болған жағдайда қозғалыс параметрлерін нақты уақыт режимінде түзетеді.

Навигация алгоритмінің орындалуы бірнеше бірізді кезеңнен тұрады. Алдымен LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер алдын ала өңделіп, көпсенсорлы біріктіру алгоритмі арқылы роботтың ағымдағы күйі анықталады. Кейін қоршаған ортаның картасы жаңартылып, қозғалыс аймағындағы кедергілер анықталады. Осы мәліметтер негізінде траекторияны жоспарлау модулі бастапқы және

мақсатты күйлер арасында қауіпсіз маршрутты қалыптастырады, ал басқару жүйесі жетекші доңғалақтарға қозғалыс командаларын қалыптастырады [15].

Робот қозғалысы барысында жүйе үш негізгі жұмыс режимінде қызмет атқарады. Қалыпты қозғалыс режимінде робот жоспарланған траектория бойынша қозғалады. Егер сенсорлар жаңа кедергіні немесе қоршаған орта параметрлерінің өзгеруін анықтаса, жүйе қайта жоспарлау режиміне ауысып, қауіпсіз маршрут қайта есептеледі. Ал жоспарланған траектория бойынша қозғалысты жалғастыру мүмкін болмаған жағдайда немесе қауіпсіз арақашықтық бұзылған кезде басқару жүйесі авариялық тоқтату режимін іске қосады. Мұндай тәсіл роботтың қозғалыс қауіпсіздігін сақтап, сыртқы өзгерістерге нақты уақыт режимінде бейімделуіне мүмкіндік береді.

Әзірленген навигация әдісінің негізгі ерекшелігі – көпсенсорлы ақпаратты біріктіруді, динамикалық модельді, қауіпсіз траекторияны жоспарлауды және нақты уақыт режиміндегі басқаруды бір навигациялық жүйеде үйлестіру болып табылады.

Нәтижелер және оларды талқылау.

MATLAB ортасында модельдеу нәтижелері.

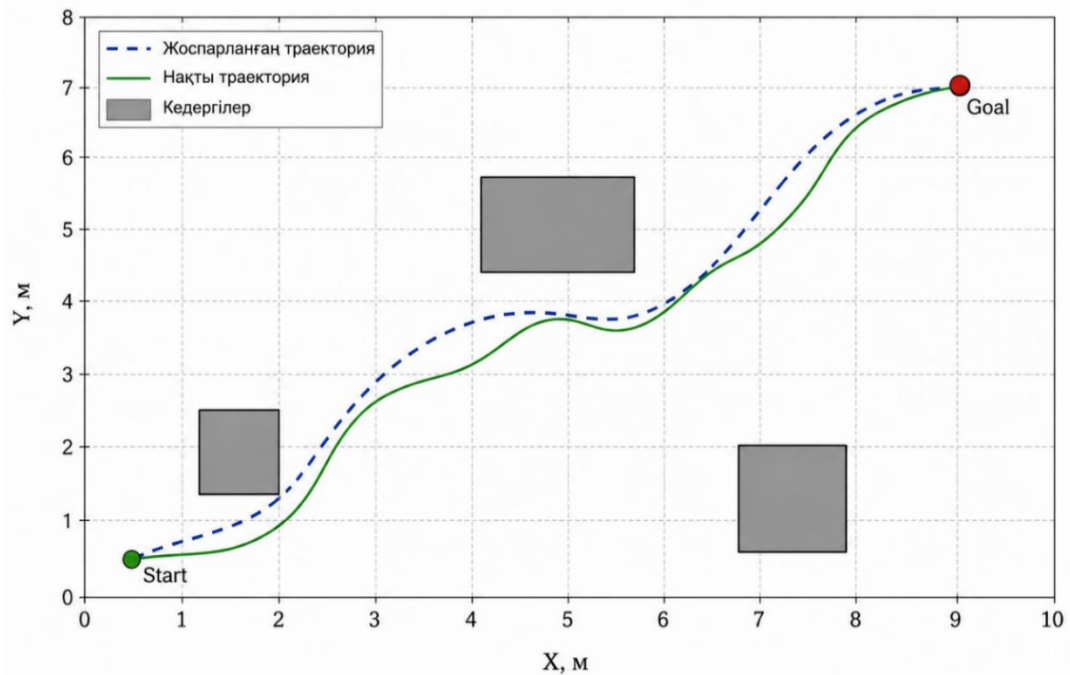
Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісінің тиімділігі MATLAB ортасында жүргізілген модельдеу арқылы бағаланды. Модельдеу барысында мобильді роботтың динамикалық моделі, көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі және қауіпсіз траекторияны жоспарлау әдісі бірыңғай модельде қарастырылды. Бағалау барысында роботтың жоспарланған траекторияны орындау дәлдігі, кедергілерді қауіпсіз айналып өту қабілеті және қозғалыс тұрақтылығы талданды.

Модельдеу шарттары мен негізгі параметрлері. Модельдеу екіөлшемді 10×8 м жұмыс аймағында жүргізілді. Мобильді робот дифференциалды жетекті платформа ретінде қарастырылып, оның массасы $m = 25$ кг, жетекші доңғалақтар арасындағы қашықтық $L = 0,50$ м, доңғалақ радиусы $r = 0,10$ м және тік оське қатысты инерция моменті $J = 1,8$ кг·м² деп қабылданды. Роботтың максималды сызықтық жылдамдығы $v_{max} = 1,0$ м/с, ал максималды бұрыштық жылдамдығы $\omega_{max} = 1,5$ рад/с мәндерімен шектелді. Модельдеудің дискреттеу қадамы $\Delta t = 0,01$ с болып белгіленді. Қозғалыс ортасында бірнеше статикалық кедергі орналастырылып, робот бастапқы күйден мақсатты нүктеге дейін қауіпсіз траектория бойынша қозғалды.

Сенсорлық өлшеулердің сыртқы әсерлерге төзімділігін бағалау үшін модельдеу барысында өлшеу мәліметтеріне нөлдік математикалық күтімі бар гаусстық шу енгізілді. LiDAR өлшеулері үшін шудың стандарттық ауытқуы $\sigma L = 0,025$ м, RGB камера негізіндегі позициялық бағалау үшін $\sigma C = 0,060$ м, IMU үшін $\sigma I = 0,045$, ал доңғалақ энкодерлері үшін $\sigma E = 0,035$ мәндері қабылданды. Әрбір сенсордың өлшеу дисперсиясы қозғалыс барысында бағаланып, оның мәніне сәйкес (5) формуласы бойынша салмақ коэффициенттері қайта есептелді. Осылайша, шу деңгейі жоғарылаған сенсордың біріктірілген күй бағасына қосатын үлесі төмендетіліп, сенімділігі жоғары сенсорлардың салмағы арттырылды.

Модельдеу барысында робот бірнеше статикалық кедергілері бар ортада қозғалды. Бастапқы және мақсатты күйлер арасында қауіпсіз траектория қалыптастырылып, қозғалыс кезінде сенсорлық ақпарат үздіксіз жаңартылып отырды. Егер жоспарланған маршрут бойында кедергі анықталса, траектория қайта есептеліп, робот жаңа бағыт бойынша қозғалысын жалғастырды. Мұндай тәсіл қозғалыс дәлдігін сақтай отырып, кедергілермен соқтығысудың алдын алуға мүмкіндік берді.

Модельдеу барысында алынған жоспарланған және нақты қозғалыс траекториялары 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2 – MATLAB ортасында статикалық кедергілерді ескере отырып жоспарланған және нақты қозғалыс траекториялары

2-суреттен жоспарланған және нақты қозғалыс траекторияларының бір-біріне жақын орналасқаны байқалады. Робот бастапқы нүктеден мақсатты орынға дейін қозғалу барысында статикалық кедергілерді қауіпсіз айналып өтті. Нақты траекторияның жоспарланған бағыттан аздаған ауытқуы платформаның динамикалық қасиеттерімен және сенсорлық өлшеулердің белгісіздігімен түсіндіріледі. Соған қарамастан қайта жоспарлау механизмі қозғалыстың тұрақтылығын сақтап, роботтың мақсатты нүктеге қауіпсіз жетуін қамтамасыз етті.

Ұсынылған әдістің тиімділігін сандық бағалау үшін үш негізгі көрсеткіш пайдаланылды: локализацияның орташа квадраттық қателігі (RMSE), жоспарланған траекториядан орташа ауытқу және кедергілерге дейінгі минималды қашықтық. Локализация қателігі роботтың бағаланған координаталары мен модельдеу ортасындағы эталондық координаталары арасындағы айырмашылық негізінде анықталды. Траекториядан ауытқу роботтың нақты орны мен жоспарланған траекторияның ең жақын нүктесі арасындағы евклидтік қашықтық ретінде есептелді. Қозғалыс қауіпсіздігі бүкіл қозғалыс кезеңіндегі робот пен кедергілер арасындағы ең кіші қашықтық арқылы бағаланды.

Қайталама сандық модельдеу нәтижесінде локализацияның орташа квадраттық қателігі (RMSE) 0,0251 м, ал жоспарланған траекториядан орташа ауытқу 0,0451 м құрады. Қозғалыс барысында робот пен кедергілер арасындағы минималды қашықтық 0,6083 м деңгейінде сақталды. Алынған сандық нәтижелер көпсенсорлы ақпаратты біріктіру кезінде робот күйін бағалау қателігінің төмен деңгейде сақталатынын, нақты қозғалыс траекториясының жоспарланған маршрутқа жақын екенін және кедергілерді айналып өту кезінде қауіпсіз арақашықтықтың сақталатынын көрсетті.

Кесте 1 – Базалық және ұсынылған көпсенсорлы біріктіру әдістерін салыстыру

Көрсеткіш	Базалық әдіс	Ұсынылған әдіс
Сенсорлардың салмақ коэффициенттері	Тұрақты, $w_i=0,25$ $w_i=0,25$	Өлшеу дисперсиясына сәйкес бейімделетін
Локализация қателігі (RMSE), м	0,0308	0,0251
RMSE төмендеуі, %	–	18,5

Ұсынылған әдістің тиімділігін салыстырмалы бағалау үшін базалық көпсенсорлы біріктіру әдісі қарастырылды. Базалық нұсқада LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінің өлшеулеріне бірдей тұрақты салмақ коэффициенттері ($w_i=0,25$ $w_i=0,25$) берілді, ал ұсынылған әдісте салмақ коэффициенттері сенсорлық өлшеулердің ағымдағы дисперсиясына сәйкес бейімделіп отырды. Салыстыру бірдей модельдеу шарттары мен сенсорлық шу деңгейлерінде жүргізілді.

1-кестеде көрсетілгендей, базалық әдісте локализацияның орташа квадраттық қателігі 0,0308 м болса, ұсынылған әдісте бұл көрсеткіш 0,0251 м құрады. Осылайша, бейімделетін салмақ коэффициенттерін қолдану локализация RMSE мәнін базалық әдіспен салыстырғанда шамамен 18,5 %-ға төмендетті. Бұл нәтиже өлшеу белгісіздігі жоғары сенсорлардың қорытынды күй бағасына әсерін азайтып, сенімділігі жоғары сенсорлардың үлесін арттыру принципімен түсіндіріледі.

Салыстырмалы нәтижелер ұсынылған бейімделетін көпсенсорлы біріктіру тәсілінің тұрақты салмақ коэффициенттеріне негізделген базалық әдіске қарағанда робот күйін бағалау дәлдігін арттыратынын көрсетті. Алынған күй бағасының дәлдігінің артуы траекторияны жоспарлау және қозғалысты басқару модульдеріне берілетін навигациялық ақпараттың сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

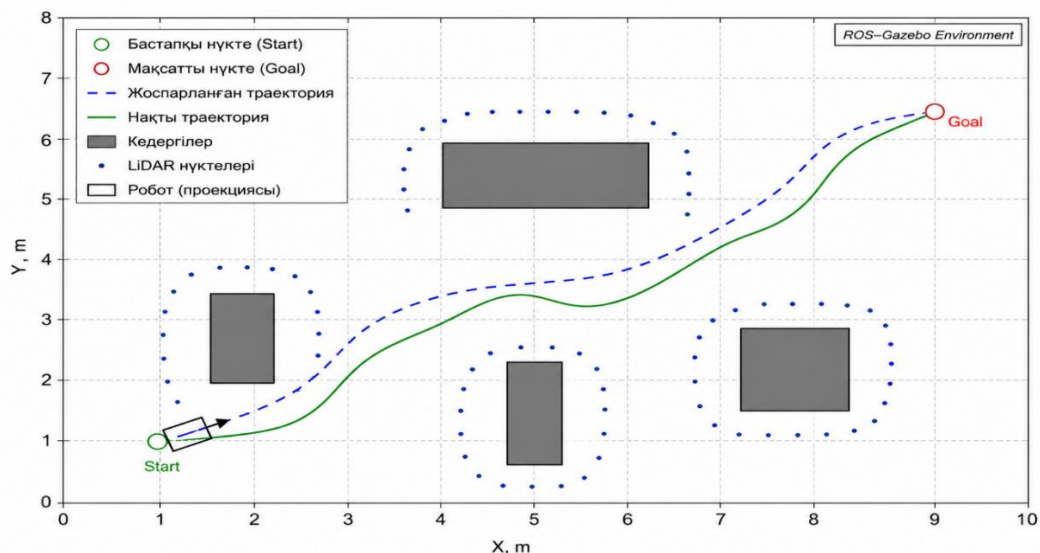
Модельдеу нәтижелері ұсынылған қауіпсіз навигация әдісінің жұмыс қабілеттілігін растады. Робот жоспарланған маршрутты тұрақты орындап, кедергілер анықталған жағдайда қозғалыс бағытын автоматты түрде қайта жоспарлады. Көпсенсорлы ақпаратты біріктіру роботтың орналасуын бағалау тұрақтылығын арттырып, жоспарланған траекториядан ауытқуды азайтуға мүмкіндік берді.

ROS–Gazebo ортасында тексеру нәтижелері.

Ұсынылған қауіпсіз навигация әдісінің жұмыс қабілеті ROS–Gazebo ортасында мобильді роботтың виртуалды моделі арқылы тексерілді. Модельдеу барысында LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінің виртуалды үлгілері пайдаланылып, сенсорлық мәліметтер ROS түйіндері арқылы өңделді. Роботтың бастапқы және мақсатты күйлері, сондай-ақ қозғалыс аймағындағы статикалық кедергілер MATLAB ортасында қолданылған сценарийге сәйкес берілді.

ROS–Gazebo ортасында сенсорлық мәліметтерді қабылдау, роботтың ағымдағы күйін бағалау, қауіпсіз траекторияны қалыптастыру және қозғалыс командаларын орындау үдерістері нақты уақыт режимінде жүзеге асырылды. Қозғалыс барысында қоршаған орта картасы үздіксіз жаңартылып, анықталған кедергілерге сәйкес маршрут қайта жоспарланып отырды. Бұл тәсіл жоспарланған траекторияны сақтай отырып, роботтың қауіпсіз қозғалысын қамтамасыз етуге мүмкіндік берді. Кедергі қозғалыс бағытына жақын орналасқан жағдайда траектория қайта есептеліп, робот қауіпсіз маршрут бойынша қозғалысын жалғастырды.

Ұсынылған алгоритмнің ROS–Gazebo ортасындағы жұмыс нәтижесі 3-суретте көрсетілген.



Сурет 3 – ROS–Gazebo ортасында мобильді роботтың қауіпсіз навигациясын модельдеу нәтижесі

3-суреттен ұсынылған қауіпсіз навигация алгоритмінің ROS–Gazebo ортасында тұрақты жұмыс істегені байқалады. Мобильді робот бастапқы нүктеден мақсатты орынға дейін қозғалу барысында статикалық кедергілерді қауіпсіз айналып өтіп, жоспарланған маршрут бойынша қозғалысын сақтады. Жоспарланған және нақты траекториялардың өзара жақын орналасуы басқару алгоритмінің тұрақтылығын көрсетті. Сонымен қатар LiDAR сенсорынан алынған мәліметтер қоршаған ортадағы кедергілерді уақытылы анықтауға мүмкіндік берді, ал көпсенсорлы ақпаратты біріктіру алгоритмі роботтың орналасуын сенімді бағалап, қозғалыс бағытын нақты уақыт режимінде түзетуді қамтамасыз етті.

ROS–Gazebo ортасындағы тексеру MATLAB ортасында қарастырылған модельдеу сценарийінің бағдарламалық-роботтық ортада орындалу мүмкіндігін бағалау мақсатында жүргізілді. Сандық бағалау нәтижелері бойынша локализацияның орташа квадраттық қателігі (RMSE) 0,0251 м, жоспарланған траекториядан орташа ауытқу 0,0451 м, ал робот пен кедергілер арасындағы минималды қашықтық 0,6083 м құрады. ROS–Gazebo ортасындағы модельдеу осы көрсеткіштермен сипатталған қозғалыс режимінің бағдарламалық ортада да тұрақты орындалатынын сапалық тұрғыдан растады. Алгоритмнің орындалу уақыты пайдаланылатын есептеу платформасының аппараттық сипаттамаларына және бағдарламалық ортаның конфигурациясына тәуелді болғандықтан, осы жұмыста жеке сандық көрсеткіш ретінде бағаланбады.

Қорытынды.

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде көпсенсорлы ақпарат негізінде мобильді роботтандырылған платформаның қауіпсіз навигациясын жетілдіруге арналған әдіс ұсынылды. Әзірленген әдісте LiDAR, RGB камера, IMU және доңғалақ энкодерлерінен алынған мәліметтер біріктіріліп, роботтың ағымдағы күйін бағалау және қауіпсіз қозғалыс траекториясын қалыптастыру жүзеге асырылды.

Әдістің тиімділігі сандық модельдеу нәтижелері негізінде бағаланып, ұсынылған навигациялық алгоритмнің жұмыс қабілеті ROS–Gazebo бағдарламалық ортасында қосымша тексерілді. Модельдеу нәтижелері мобильді роботтың жоспарланған маршрут бойынша тұрақты қозғалып, статикалық кедергілерді қауіпсіз айналып өтетінін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері ұсынылған әдістің мобильді роботтандырылған платформалардың қауіпсіз автономды навигация жүйелерінде қолдануға жарамды екенін

көрсетті. Әзірленген тәсіл өндірістік автоматтандыруда, қоймалық логистикада, интеллектуалды көлік жүйелерінде және сервистік робототехникада автономды мобильді роботтарды басқару жүйелерін әзірлеуге негіз бола алады.

Болашақ зерттеулерде ұсынылған әдісті динамикалық орта жағдайында жетілдіру, сыртқы шуылдардың әсерін тереңірек зерттеу, сондай-ақ нақты мобильді робот платформасында эксперименттік тексеру жоспарлануда.

Әдебиеттер

1. Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3), 108–117.
2. Corke, P. (2017). *Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in MATLAB* (2nd ed.). Springer.
3. Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2), 99–110.
4. Fan, Z., Zhang, L., Wang, X., Shen, Y., & Deng, F. (2025). LiDAR, IMU, and camera fusion for simultaneous localization and mapping: A systematic review. *Artificial Intelligence Review*, 58, Article 174. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11187-w>
5. Filipenko, M., & Afanasyev, I. (2018). Comparison of various SLAM systems for mobile robot in an indoor environment. In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)* (pp. 400–407). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710464>
6. Jiao, J., Wei, H., Hu, T., Hu, X., Zhu, Y., He, Z., Wu, J., Yu, J., Xie, X., Huang, H., Geng, R., Wang, L., & Liu, M. (2022). FusionPortable: A multi-sensor campus-scene dataset for evaluation of localization and mapping accuracy on diverse platforms. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3851–3856). IEEE.
7. LaValle, S. M. (2006). *Planning algorithms*. Cambridge University Press.
8. Al-Tawil, B., Candemir, A., Jung, M., & Al-Hamadi, A. (2025). Mobile robot navigation with enhanced 2D mapping and multi-sensor fusion. *Sensors*, 25(8), 2408. <https://doi.org/10.3390/s25082408>
9. Qin, C., Ye, H., Pranata, C. E., Han, J., Zhang, S., & Liu, M. (2020). LINS: A LiDAR-inertial state estimator for robust and efficient navigation. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 8899–8906). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197567>
10. Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., & Ng, A. Y. (2009). ROS: An open-source robot operating system. In *ICRA Workshop on Open Source Software*.
11. Rahman, M. M., Mahmud, J. A., Ali, M. F., Rahim, M. A., Sarker, S. K., & Yan, B. (2026). ROS2-based real-time autonomous mapping and navigation: Integrating visual SLAM and sensor fusion with performance analysis under varying light. *Measurement*, 268, 120695. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.120695>
12. Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). *Springer handbook of robotics* (2nd ed.). Springer.
13. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots* (2nd ed.). MIT Press.
14. Spiess, F., Friesslich, J., Kaupp, T., Kounev, S., & Strobel, N. (2020). Survey and experimental comparison of RGB-D indoor robot navigation methods supported by ROS and their expansion via fusion with wheel odometry and IMU data. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9(12), 1532–1540.
15. Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2000). *Probabilistic robotics*. MIT Press.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЕНСОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. В работе предложен метод повышения безопасности автономной навигации мобильной роботизированной платформы на основе объединения многосенсорной информации. Цель исследования заключается в надежной оценке положения робота и формировании безопасной траектории движения с учетом препятствий путем интеграции данных, получаемых от LiDAR, RGB-камеры, инерциального измерительного модуля (IMU) и энкодеров колес. Предлагаемый метод объединяет в единую систему динамическую модель мобильной платформы, алгоритм слияния многосенсорных данных, модуль оценки окружающей среды, планирование безопасной траектории и управление движением в реальном времени. Динамическая модель учитывает параметры движения робота, угловые скорости колес и управляющие воздействия. На основе объединенной сенсорной информации определяется текущее положение и состояние движения робота, после чего данные передаются в систему планирования траектории и управления. При формировании безопасного маршрута учитывается минимальное расстояние между роботизированной платформой и препятствиями, что позволяет определить направление движения с пониженным риском столкновения. Эффективность метода оценивалась в средах моделирования MATLAB и ROS–Gazebo. В ходе экспериментов исследовалось движение робота по заданному маршруту, обнаружение статических препятствий и их безопасный обход. Дополнительно в сенсорные данные вносился внешний шум для оценки устойчивости предложенного подхода к измерительным ошибкам. Результаты показали, что объединение многосенсорной информации повышает устойчивость оценки положения робота, обеспечивает стабильное отслеживание траектории и способствует повышению безопасности навигации. Предложенный метод может применяться при разработке автономных навигационных систем мобильных роботов для промышленной автоматизации, складской логистики и сервисной робототехники.

Ключевые слова: мобильная роботизированная платформа, безопасная навигация, объединение многосенсорной информации, LiDAR, RGB-камера, IMU, энкодер колеса, динамическая модель, планирование траектории, ROS–Gazebo.

IMPROVEMENT OF SAFE NAVIGATION FOR A MOBILE ROBOTIC PLATFORM BASED ON MULTI-SENSOR INFORMATION

Abstract. This study presents a method for improving the safety of autonomous navigation of a mobile robotic platform through multi-sensor data fusion. The main objective is to reliably estimate the robot's position and generate a safe motion trajectory in the presence of obstacles by integrating data obtained from LiDAR, an RGB camera, an inertial measurement unit (IMU), and wheel encoders. The proposed method integrates the dynamic model of the mobile platform, a multi-sensor data fusion algorithm, an environmental assessment module, safe trajectory planning, and real-time motion control within a unified framework. The dynamic model accounts for the robot's motion parameters, wheel angular velocities, and control inputs. Based on the fused sensor information, the current position and motion state of the robot are estimated, and the resulting data are transferred to the trajectory planning and control system. During safe trajectory generation, the minimum distance between the robotic platform and surrounding obstacles is considered to determine a motion direction with a reduced risk of collision. The effectiveness of the proposed method was evaluated using MATLAB and ROS–Gazebo simulation environments. The experiments investigated the robot's motion along a predefined route, detection of static obstacles, and their safe avoidance. In addition, external noise was introduced into the sensor

measurements to evaluate the robustness of the proposed approach to measurement errors. The results demonstrated that multi-sensor data fusion improves the stability of robot position estimation, enables consistent trajectory tracking, and contributes to safer autonomous navigation. The proposed method can be applied to the development of autonomous navigation systems for mobile robots in industrial automation, warehouse logistics, and service robotics.

Keywords: mobile robotic platform, safe navigation, multi-sensor data fusion, LiDAR, RGB camera, IMU, wheel encoder, dynamic model, trajectory planning, ROS–Gazebo.

Сведение об авторах

Жәрдемқызы Салтанат	Магистр, сеньор-лектор кафедры «Организация авиационных перевозок и логистика» Академия Гражданской Авиации, E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz
Бактыбаев Мурат Кыргызбаевич	К.ф.м.н. - Институт автоматизации и информационных технологий Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), Email: murat.baktybayev@gmail.com
Алимбаев Чингиз Абдраимович	Ph.D, ассоц. профессор - Институт автоматизации и информационных технологий Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), E-mail: c.alimbayev@satbayev.university
Бердибаева Гульмира Куанышбаевна	Ph.D, ассоц. профессор - Институт автоматизации и информационных технологий Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), Email: g.berdibayeva@satbayev.university

Авторлар туралы мәлімет

Жәрдемқызы Салтанат	Магистр, «Әуе тасымалдарын ұйымдастыру және логистика» кафедрасының сеньор-лекторы. Азаматтық авиация академиясы, E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz
Бактыбаев Мурат Кыргызбайұлы	Ф.м.ғ.к., - Автоматика және ақпараттық технологиялар институты Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (ҚазҰТЗУ) E-mail: murat.baktybayev@gmail.com
Алимбаев Чингиз Абдраимович	Ph.D., қауымдастырылған профессор - Автоматика және ақпараттық технологиялар институты. Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (ҚазҰТЗУ) E-mail: c.alimbayev@satbayev.university
Бердибаева Гульмира Куанышбаевна	Ph.D., қауымдастырылған профессор - Автоматика және ақпараттық технологиялар институты. Робототехника және автоматиканың техникалық құралдары кафедрасы Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (ҚазҰТЗУ) E-mail: g.berdibayeva@satbayev.university

Information about the authors

Saltanat Zhardemkyzy	Master's Degree, Senior Lecturer, Department of Air Transportation Organization and Logistics. Academy of Civil Aviation. E-mail: s.zhardemqyzy@agakaz.kz
Murat Kyrgyzbayevich Baktybayev	Candidate of Physical and Mathematical Sciences - Institute of Automation and Information Technologies. Department of Robotics and Technical Means of Automation Satbayev University. E-mail: murat.baktybayev@gmail.com
Shyngys Abdraimovich Alimbayev	Ph.D, Associate Professor - Institute of Automation and Information Technologies Department of Robotics and Technical Means of Automation Satbayev University. E-mail: c.alimbayev@satbayev.university
Gulmira Kuanyshevna Berdibayeva	Ph.D, Associate Professor - Institute of Automation and Information Technologies Department of Robotics and Technical Means of Automation Satbayev University. E-mail: g.berdibayeva@satbayev.university