

## YO'L QURILISH MASHINALARINING AVTONOM BOSHQARUV TIZIMLARIDA SENSORLI MA'LUMOTLARNI INTEGRATSIYALASH VA TRAYEKTORIYANI OPTIMALLASHTIRISH ALGORITMLARI

**Sharifjonov Sardorbek Abdujabbor o'g'li**

*“Namangan mintaqaviy yo'llarga buyurtmachi xizmati” davlat muassasasi*

*Loyiha ta'minoti bo'limi bosh mutaxasisi*

*Email: [sharifjonovsardor7717@gmail.com](mailto:sharifjonovsardor7717@gmail.com)*

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada yo'l qurilish mashinalarining avtonom boshqaruv tizimlarida ko'p datchikli ma'lumotlarni integratsiyalash (Sensor Fusion) va harakat trayektoriyasini optimallashtirish masalalari tadqiq etiladi. Tadqiqotning asosiy maqsadi qurilish maydonchasining dinamik va noaniq muhitida mashinalarning aniq pozitsiyalanishi hamda energiya samaradorligini ta'minlovchi algoritmlarni ishlab chiqishdir. Maqolada LiDAR, radar va vizual sensorlar ma'lumotlarini Kalman filtri hamda neyron tarmoqlari yordamida birlashtirish usullari tahlil qilingan. Shuningdek, murakkab relyef sharoitida to'siqlardan qochish va optimal yo'nalishni hisoblash uchun variatsion hisoblash usullariga asoslangan trayektoriya optimallashtirish modellari taklif etilgan. Olingan natijalar avtonom tizimlarning qaror qabul qilish tezligi va texnologik jarayonlar aniqligini sezilarli darajada oshirishga xizmat qiladi.

**Kalit so'zlar:** Avtonom yo'l qurilish mashinalari, sensorlar integratsiyasi, LiDAR, Kalman filtri, trayektoriyani optimallashtirish, dinamik muhit, mashinali o'qitish, intellektual boshqaruv.

**Abstract.** This article investigates the integration of multi-sensor data (Sensor Fusion) and trajectory optimization algorithms in the autonomous control systems of road construction machinery. The primary objective of the research is to develop algorithms that ensure precise positioning and energy efficiency of machinery within the dynamic and uncertain environments of construction sites. The study analyzes methods for fusing data from LiDAR, radar, and visual sensors using Kalman filtering and neural networks. Furthermore, trajectory optimization models based on variational calculus are proposed to facilitate obstacle avoidance and optimal path planning in complex terrain conditions. The results demonstrate a significant enhancement in the decision-making speed of autonomous systems and the overall precision of technological processes.

**Key words:** Autonomous road construction machinery, sensor fusion, LiDAR, Kalman filter, trajectory optimization, dynamic environment, machine learning, intelligent control.

**Аннотация.** В данной статье исследуются вопросы интеграции данных мультисенсорных систем (Sensor Fusion) и алгоритмы оптимизации траектории в системах автономного управления дорожно-строительными машинами. Основная цель исследования разработка алгоритмов, обеспечивающих точное позиционирование и энергоэффективность техники в динамичных и неопределенных условиях строительной площадки. В работе проанализированы методы

*объединения данных LiDAR, радаров и визуальных сенсоров с использованием фильтра Калмана и нейронных сетей. Также предложены модели оптимизации траектории на основе вариационного исчисления для обхода препятствий и расчета оптимального маршрута в условиях сложного рельефа. Полученные результаты способствуют значительному повышению скорости принятия решений автономными системами и точности технологических процессов.*

**Ключевые слова:** *Автономные дорожно-строительные машины, интеграция сенсоров, LiDAR, фильтр Калмана, оптимизация траектории, динамическая среда, машинное обучение, интеллектуальное управление.*

### **Kirish.**

Hozirgi vaqtda global miqyosda kechayotgan to‘rtinchi sanoat inqilobi (Industry 4.0) va qurilish sohasini raqamlashtirish tendensiyalari yo‘l-transport infratuzilmasini barpo etish jarayonlariga fundamental o‘zgarishlar olib kirmoqda. Zamonaviy yo‘l qurilish majmualari oldida turgan asosiy vazifalar texnologik jarayonlar aniqligini oshirish, inson omili bilan bog‘liq xavflarni minimallashtirish va resurslar samaradorligini maksimallashtirishdan iboratdir. Shu nuqtayi nazardan, an‘anaviy boshqaruv tizimlaridan intellektual va avtonom boshqaruv tizimlariga o‘tish davr talabiga aylanib bormoqda. Biroq, yo‘l qurilish maydonchalarining o‘ziga xos murakkab tabiati o‘zgaruvchan relyef, yuqori darajadagi chang va vibratsiya, shuningdek, dinamik to‘siqlarning mavjudligi avtonom mashinalarni xavfsiz va aniq boshqarishda jiddiy ilmiy-texnik to‘siqlarni yuzaga keltirmoqda. Bu esa, o‘z navbatida, tashqi muhitni idrok etish va qaror qabul qilish algoritmlarini sifat jihatidan yangi bosqichga ko‘tarishni taqazo etadi.

Avtonom yo‘l qurilish mashinalarining muvaffaqiyatli ishlashi bevosita ularning atrofdagi fazoviy ma‘lumotlarni qanchalik aniq tahlil qila olishiga bog‘liq. Hozirgi kunda qo‘llanilayotgan global navigatsiya sun‘iy yo‘ldosh tizimlari (GNSS) yoki lokal sensorlar (LiDAR, kameralar, radarlar) alohida olinganda qurilish maydonining barcha noaniqliklarini qoplash imkoniyatiga ega emas. Masalan, baland binolar yoki daraxtlar yaqinida GNSS signallarining uzilishi yoki optik sensorlarning changli muhitda sezgirligi pasayishi tizim barqarorligiga putur yetkazadi. Shu sababli, turli tabiatli sensorlardan kelayotgan heterogen ma‘lumotlar oqimini yagona axborot maydoniga integratsiyalash (Sensor Fusion) masalasi tadqiqotning eng dolzarb qismlaridan biri hisoblanadi. Mazkur jarayonda ma‘lumotlardagi stoxastik shovqinlarni filtrlovchi va datchiklar orasidagi nomuvofiqliklarni bartaraf etuvchi adaptiv algoritmlarni ishlab chiqish, mashinaning real vaqt rejimida o‘z joylashuvini yuqori aniqlikda aniqlashiga zamin yaratadi.

Faqatgina ma‘lumotlarni yig‘ish bilan cheklanib qolmasdan, olingan axborotlar asosida mashinaning optimal harakat strategiyasini belgilash ham muhim ilmiy ahamiyatga ega. Yo‘l qurilish mashinalari uchun trayektoriyani optimallashtirish masalasi oddiy transport vositalaridan farqli o‘laroq, nafaqat geodezik nuqtalarni bosib o‘tishni, balki texnologik jarayonning o‘ziga xos cheklovlarini (masalan, krestonlik burchagi, tuproq qarshiligi, energiya sarfi) ham hisobga olishni talab qiladi. Mavjud trayektoriya qurish algoritmlari

ko‘pincha mashinaning murakkab kinematikasi va dinamik parametrlarini soddalashtirilgan holda ko‘rib chiqadi, bu esa amaliyotda kutilmagan xatoliklarga yoki energiya sarfining asossiz ortishiga olib keladi. Binobarin, mashinaning konstruktiv imkoniyatlari va qurilish maydonining relyef xususiyatlarini o‘zida mujassam etgan ko‘p kriteriyali optimallashtirish modellarini yaratish avtonom tizimlarning samaradorligini ta‘minlovchi asosiy omildir.

Ushbu tadqiqot ishining maqsadi yuqorida qayd etilgan muammolarni bartaraf etishga yo‘naltirilgan bo‘lib, yo‘l qurilish mashinalarining avtonom boshqaruv tizimlari uchun sensorli ma‘lumotlarni integratsiyalashning yangi uslubiyotini va trayektoriyani optimallashtirishning takomillashtirilgan algoritmlarini ishlab chiqishdan iboratdir. Tadqiqot doirasida LiDAR va inertial navigatsiya tizimlari ma‘lumotlarini adaptiv filtrlar yordamida birlashtirish orqali mashinaning lokalizatsiya aniqligini oshirish, shuningdek, variatsion hisoblash metodlari asosida minimal energiya sarfi bilan eng xavfsiz harakat yo‘nalishini aniqlash modellari taklif etiladi. Mazkur yondashuv yo‘l qurilishida texnologik operatsiyalar sifatini yangi bosqichga olib chiqish bilan bir qatorda, og‘ir texnikalarning avtonomiya darajasini oshirish bo‘yicha nazariy va amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

#### **Mavzuga oid adabiyotlar sharhi**

Yo‘l qurilish mashinalarining avtonom boshqaruv tizimlarini yaratish va ularni intellektual darajaga ko‘tarish masalalari so‘nggi yillarda "Aqlli qurilish" (Smart Construction) konsepsiyasining ajralmas qismi sifatida tadqiq etilmoqda. Ilmiy manbalarning tahlili shuni ko‘rsatadiki, avtonom boshqaruvning fundamental asosi hisoblangan atrof-muhitni idrok etish tizimlari (Perception Systems) dastlab umumiy transport vositalari uchun ishlab chiqilgan algoritmlarga tayangan. Biroq, yo‘l qurilish maydonchalarining o‘ta murakkab va stoxastik tabiati o‘zgaruvchan relyef, yuqori darajadagi chang, doimiy vibratsiya va dinamik to‘siqlarning mavjudligi an‘anaviy datchiklar va ularni integratsiyalash usullarining ishonchliligini shubha ostiga qo‘yadi. Ko‘plab tadqiqotchilar (masalan, Li va Vang) o‘z ishlarida LiDAR va vizual sensorlar ma‘lumotlarini birlashtirishda Kalman filtrlarining turli modifikatsiyalarini taklif etishgan bo‘lsada, ushbu yondashuvlar ko‘pincha qurilish maydonidagi ekstremal shovqinlarni (noise) hisobga olmagan sababli real amaliyotda kutilgan aniqlikni bermasligi kuzatilgan.

Sensorli ma‘lumotlarni integratsiyalash (Sensor Fusion) sohasidagi zamonaviy izlanishlar heterogen ma‘lumotlar oqimini qayta ishlashning yanada murakkab arxitekturalarini talab etmoqda. Adabiyotlarda global navigatsiya sun‘iy yo‘ldosh tizimlari (GNSS) va inertial navigatsiya tizimlari (INS) o‘rtasidagi bog‘liqlikni kuchaytirish uchun Bayes ehtimollik modellari va neyro-fazzi algoritmlaridan foydalanish bo‘yicha sezilarli ilmiy natijalar to‘plangan. Shunga qaramay, qurilish texnikasining o‘ziga xos ishchi sikllari tuproq qazish, tekislash va asfalt yotqizish jarayonlaridagi kuchli mexanik tebranishlar datchiklarning o‘lchash xatoliklarini geometrik progressiya bilan oshirib yuboradi. Shu bois, so‘nggi yillardagi tadqiqot yo‘nalishlari "Deep Sensor Fusion" ya‘ni chuqur o‘qitishga asoslangan sensorlar integratsiyasiga siljimoqda, bu esa tizimga tashqi

shovqinlarni avtomatik tarzda filtrlash va datchiklar orasidagi nomuvofiqliklarni (disparity) dinamik ravishda to'g'rilash imkonini beradi.

Trayektoriyani optimallashtirish va harakatni rejalashtirish masalalari bo'yicha olib borilgan izlanishlar ham o'ziga xos evolyutsion yo'lni bosib o'tdi. Dastlabki bosqichlarda qo'llanilgan  $A^*$  va *Dijkstra* kabi grafik qidiruv algoritmlari statik to'siqlarni chetlab o'tishda samarali bo'lsada, ular yo'l qurilish mashinalarining nelinear kinematikasi va cheklangan burilish radiusini yetarlicha hisobga olmaydi. Keyinchalik tadqiqotlarda ommalashgan *Rapidly-exploring Random Tree (RRT)* va uning modifikatsiyalari yuqori o'lchamli fazolarda yo'l topish imkoniyatini bersada, ular hosil qilgan trayektoriya ko'p hollarda "silliq" (smooth) bo'lmasligi sababli og'ir texnikalarning mexanik uzatmalariga ortiqcha yuklanish berishi aniqlangan. Bu muammoni hal qilish uchun zamonaviy adabiyotlarda *Model Predictive Control (MPC)* uslubiyoti tavsiya etilmoqda, biroq ushbu modelning hisoblash murakkabligi real vaqt rejimida qaror qabul qilish tezligiga to'sqinlik qilayotganligi asosiy ilmiy ziddiyatlardan biri bo'lib qolmoqda.

Bundan tashqari, yo'l qurilish mashinalari uchun trayektoriya qurishda faqatgina geometrik masofani emas, balki texnologik va energetik ko'rsatkichlarni ham optimallashtirish zaruriyati yuzaga kelmoqda. Ayrim ilmiy maktablar (masalan, Germaniya va Yaponiya tadqiqotchilari) "Soil-Machine Interaction" ya'ni mashina va tuproqning o'zaro ta'sir dinamikasini trayektoriya qurish algoritmlariga kiritishni taklif etishmoqda. Ushbu yondashuv avtonom buldozer yoki ekskavatorning harakat yo'nalishini belgilashda tuproqning qarshilik kuchi va mashinaning tortish kuchini inobatga olgan holda energiya sarfini 15-20 foizgacha tejash imkonini beradi. Biroq, bunday ko'p kriteriyali optimallashtirish modellari qurilish maydonining o'zgaruvchan geodezik parametrlariga (namlik, zichlik, qatlam qalinligi) juda sezgir bo'lib, ularning adaptivligini ta'minlash bugungi kunda nazariy jihatdan to'liq shakllanmagan soha hisoblanadi.

Xorijiy adabiyotlarda yana bir dolzarb yo'nalish sifatida "Multi-agent System" (ko'p agentli tizimlar) konsepsiyasi ilgari surilmoqda, bunda bir nechta avtonom yo'l qurilish mashinalarining o'zaro muvofiqlashgan harakati tadqiq etiladi. Masalan, asfalt yotqizish jarayonida asfalt yotqizgich va yuk mashinalarining harakat trayektoriyalarini sinxronlashtirish texnologik uzilishlarning oldini olishga xizmat qiladi. Biroq, ushbu yo'nalishdagi tadqiqotlarning aksariyati faqat simulyatsiya darajasida bo'lib, real qurilish sharoitlaridagi aloqa uzilishlari va sensorli noaniqliklar sharoitida tizimning turg'unligini (robustness) ta'minlash masalalari ochiq qolmoqda. Bu esa, o'z navbatida, sensorli ma'lumotlarni integratsiyalashning yangi usullari va trayektoriyani optimallashtirishning yanada ishonchli algoritmlarini ishlab chiqishni talab qiluvchi keng qamrovli ilmiy bo'shliqni yuzaga keltirmoqda.

#### **Tadqiqot metodologiyasi**

Ushbu tadqiqotning metodologik asosi sifatida yo'l qurilish mashinalarining dinamik ish muhitida o'z-o'zini boshqarish jarayonini modellashtirish uchun tizimli tahlil va matematik dasturlash usullari tanlab olindi. Tadqiqot jarayoni ikki asosiy bosqichdan iborat: birinchidan, heterogen sensorlar ma'lumotlarini yuqori aniqlikda birlashtirish

algoritmi ishlab chiqildi, ikkinchidan, olingan fazoviy ma'lumotlar asosida mashina kinematikasini hisobga oluvchi ko'p kriteriyali trayektoriya optimallashtirish modeli yaratildi. Tadqiqotda ob'ektning holatini baholash uchun stoxastik jarayonlar nazariyasi, xususan, nelinear tizimlarni filtrlovchi kengaytirilgan Kalman filtri (EKF) metodikasidan foydalanildi. Bu yondashuv LiDAR datchiklaridan olingan bulutli ma'lumotlar (point clouds) va inertial navigatsiya tizimlari (IMU) signallaridagi shovqinlarni minimallashtirish imkonini beradi.

Sensorli ma'lumotlarni integratsiyalash bosqichida LiDAR, GNSS va IMU qurilmalaridan olingan o'lchov natijalari yagona koordinatalar tizimiga keltirildi. Ma'lumotlarni qayta ishlashda "Sensor Fusion" texnologiyasining markazlashgan arxitekturasi qo'llanildi, bunda har bir datchikdan keladigan ma'lumot oqimi avval lokal filtrlashdan o'tkazilib, so'ngra tizimning umumiy holat vektoriga integratsiya qilinadi. Mashinaning fazoviy holati quyidagi holat vektori orqali ifodalandi:

$$x_k = [x, y, z, \theta, \varphi, v, a]^T$$

Bunda  $x, y, z$  - koordinatalar,  $\theta, \varphi$  - yo'nalish burchaklari,  $v$  - tezlik va  $a$  - tezlanish ko'rsatkichlaridir. Sensorlar orasidagi vaqtinchalik va fazoviy nomuvofiqliklarni (spatial-temporal calibration) bartaraf etish uchun vaqt tamg'alari (time-stamping) va kvaternionlar nazariyasiga asoslangan geometrik transformatsiyalar metodikasi tatbiq etildi.

Trayektoriyani optimallashtirish algoritmini ishlab chiqishda variatsion hisoblash va dinamik dasturlash tamoyillaridan foydalanildi. Yo'l qurilish mashinasining harakat yo'nalishi nafaqat eng qisqa masofani, balki energiya sarfini minimallashtirish va texnologik cheklovlarni (masalan, yo'lning maksimal qiyaligi va mashinaning burilish radiusi) qondirishni maqsad qiladi. Shu maqsadda tadqiqotda maqsad funksiyasi (Cost function) quyidagi ko'rinishda shakllantirildi:

$$J = w_1 \int_0^T \|\dot{x}(t)\|^2 dt + w_2 \int_0^T k(t)^2 dt + w_3 \Delta E$$

Bu yerda  $w_1, w_2, w_3$  - vazn koeffitsientlari,  $k(t)$  - trayektoriya egriligi,  $\Delta E$  - harakat davomidagi energiya sarfi. Algoritmning ishonchliligini ta'minlash uchun murakkab relyef sharoitida to'siqlardan qochishning evristik yondashuvlari (RRT\* algoritmi modifikatsiyasi) va dinamik deraza (Dynamic Window Approach) usullari o'zaro uyg'unlashtirildi.

Tadqiqotning amaliy qismi va algoritmlarni aprobatsiya qilish "Robot Operating System" (ROS) muhitida hamda Gazebo simulyatsiya platformasida o'tkazildi. Simulyatsiya jarayonida real yo'l qurilish maydonining 3D raqamli modeli yaratildi va mashina datchiklarining fizik xarakteristikalarini (LiDAR-ning ko'rish burchagi, datchiklarning o'lchash xatoligi) real qiymatlarga maksimal darajada yaqinlashtirildi. Tadqiqot natijalarining aniqligi RMSE (Root Mean Square Error) metrikasi yordamida baholandi, bunda nazariy hisoblangan trayektoriya va mashinaning simulyatsiyadagi real harakati o'rtasidagi farq tahlil qilindi. Mazkur metodologik yondashuv taklif etilayotgan algoritmlarning nafaqat nazariy jihatdan mukammalini, balki real ishlab chiqarish sharoitlarida qo'llash imkoniyatini ham ilmiy jihatdan asoslab beradi.

### Tahlil va natijalar

Tadqiqotning eksperimental qismi taklif etilgan algoritmlarning samaradorligini tekshirish maqsadida "Robot Operating System" (ROS) va Gazebo platformalarida amalga oshirildi. Mazkur simulyatsiya muhitida real yo‘l qurilish maydonchasining raqamli egizagi yaratilib, unda turli darajadagi relyef murakkabliklari va dinamik to‘siqlar aks ettirildi. Mashina modeli sifatida avtonom buldozerning nelinear kinematik xarakteristikalarini va datchiklarning fizik xususiyatlari aniq parametrlar asosida kiritildi. Ma’lumotlarni yig‘ish jarayoni 100 dan ortiq turli ssenariylar ostida o‘tkazilib, tizimning tashqi shovqinlarga nisbatan chidamliligi sinovdan o‘tkazildi. Har bir test natijasi tizimning lokalizatsiya aniqligi va qaror qabul qilish tezligini baholash uchun statistik tahlil qilindi. Olingan natijalar simulyatsiya muhitining real sharoitlarga maksimal darajada yaqinligini va nazariy modellarning amaliyotga mosligini ko‘rsatdi.

Sensorli ma’lumotlarni integratsiyalash algoritmining samaradorligi LiDAR, GNSS va IMU datchiklarining o‘zaro muvofiqlashgan ishlashi orqali baholandi. Faqatgina GNSS tizimidan foydalanilganda qurilish maydonidagi baland ob’ektlar tufayli signal uzilishlari va 20-30 santimetrgacha xatoliklar kuzatildi. Biroq, taklif etilgan adaptiv integratsiyalash algoritmi ushbu xatolikni sezilarli darajada kamaytirib, lokalizatsiya aniqligini 3-5 santimetr oralig‘ida saqlab qolishga muvaffaq bo‘ldi. LiDAR ma’lumotlari orqali yaratilgan "nuqtalar buluti" (point cloud) yordamida mashinaning atrof-muhitdagi o‘rnini aniqlash tezligi 40 foizga oshdi. Tizimning dinamik muhitdagi barqarorligi datchiklar o‘rtasidagi vaqtinchalik kechikishlarni kompensatsiya qilish hisobiga ta’minlandi. Bu ko‘rsatkichlar avtonom yo‘l qurilish mashinalari uchun talab qilinadigan texnologik aniqlik darajasiga to‘liq javob beradi.

Qurilish maydonidagi yuqori changlanish va vibratsiya sharoitida sensorlar o‘lchash xatoliklarining o‘zgarishi alohida tahlil qilindi. O‘tkazilgan tahlillar shuni ko‘rsatdiki, shovqinlarni filtrlashda neyro-fazzi algoritmlaridan foydalanish stoxastik xatoliklarni 25 foizga kamaytiradi. Vibratsiya darajasi yuqori bo‘lgan ishchi sikllarda IMU datchigi ma’lumotlari Kalman filtri yordamida korreksiya qilindi. Shovqinli muhitda ob’ektlarni aniqlash ehtimolligi 0,96 koeffitsientini tashkil etib, tizimning ishonchligini tasdiqladi. Vizual sensorlar va LiDAR ma’lumotlarining sintezi kutilmagan to‘siqlarni 15 metr masofadan aniqlash imkonini berdi. Ushbu natijalar tizimning agressiv ish muhitida turg‘unligini (robustness) ta’minlashda taklif etilgan metodikaning ustunligini isbotlaydi.

1-jadval.

#### Lokalizatsiya aniqligining qiyosiy tahlili (RMSE metrikasi bo‘yicha)

Metodologiya	Gorizontal xatolik (sm)	Vertikal xatolik (sm)	Hisoblash vaqti (ms)
Standart GNSS/IMU	22.4	18.6	12
LiDAR/GNSS (odatiy)	12.5	9.8	25
<b>Taklif etilgan Sensor Fusion</b>	<b>4.2</b>	<b>3.5</b>	<b>18</b>

Trayektoriyani optimallashtirish algoritmining natijalari mashinaning harakat yoʻnalishidagi silliqlik va energiya sarfi koʻrsatkichlari asosida oʻrganildi. Anʼanaviy A\* algoritmi bilan solishtirilganda, taklif etilgan MPC (Model Predictive Control) asosidagi yondashuv trayektoriya uzunligini 12 foizga qisqartirish imkonini berdi. Mashinaning burilish burchaklari va kinematik cheklovlari hisobga olinganligi sababli, harakat davomidagi mexanik uzatmalarga tushadigan yuklama kamaydi. Optimallashtirilgan trayektoriya boʻylab harakatlanishda mashinaning agʻdarilish xavfi nolga yaqinlashtirildi, bu esa murakkab relyeflarda oʻta muhim hisoblanadi. Algoritm dinamik toʻsiqlarga nisbatan 0,2 soniya ichida yangi yoʻnalishni hisoblash qobiliyatini namoyish etdi. Mazkur natijalar taklif etilayotgan modelning nafaqat geometrik, balki fizik jihatdan ham maqbul ekanligini koʻrsatadi.

Harakatni rejalashtirish jarayonida energiya samaradorligi tahlili avtonom boshqaruvning iqtisodiy foydasini aniqlashga xizmat qildi. Simulyatsiya natijalari shuni koʻrsatdiki, optimallashtirilgan trayektoriya boʻyicha harakatlanish yoqilgʻi sarfini oʻrtacha 15-18 foizga tejash imkonini beradi. Bu tejash asosan mashinaning keraksiz manevrlarni bajarmasligi va optimal tezlik rejimini saqlab turishi hisobiga erishildi. Shuningdek, tuproq qarshiligi va mashina tortish kuchining trayektoriya qurishda inobatga olinishi texnologik jarayon unumdorligini oshirdi. Eksperimentlar davomida mashinaning umumiy ish vaqti anʼanaviy usullarga qaraganda 10 foizga qisqardi. Iqtisodiy va energetik koʻrsatkichlarning bunday yaxshilanishi avtonomizatsiya jarayonining yuqori samaradorligidan dalolat beradi.

Mashina kinematikasini hisobga olgan holda trayektoriya egriligini tahlil qilish, harakat barqarorligini taʼminlashda asosiy omil boʻlib xizmat qildi. Taklif etilgan algoritm orqali hosil qilingan trayektoriya egriligi mashinaning ruxsat etilgan maksimal burilish radiusidan oshmadi. Bu esa ogʻir texnikalarning burilish vaqtida tuproq qatlamini surib yubormasligi va shinalar (yoki zanjirlar) yeyilishini kamaytirish imkonini beradi. Grafik tahlillar shuni koʻrsatdiki, trayektoriya boʻylab tezlanish oʻzgarishlari silliq xarakterga ega boʻlib, bu tizimning mexanik barqarorligini oshiradi. Trayektoriyani silliqlash (smoothing) jarayonida kubik splaynlar va variatsion hisoblash usullaridan foydalanish eng yaxshi natijani berdi. Natijada, mashinaning harakat trayektoriyasi texnologik talablarga 98 foiz aniqlik bilan muvofiqlashtirildi.

2-jadval.

**Trayektoriya optimallashtirish algoritmlarining qiyosiy koʻrsatkichlari**

Koʻrsatkichlar	A* Algoritmi	RRT* Algoritmi	Taklif etilgan Model
Yoʻl uzunligi (m)	450	432	398
Energiya sarfi (MJ)	1240	1180	950
Trayektoriya silliqligi	Past	Oʻrta	Yuqori
Toʻsiqdan qochish vaqti (s)	0.8	0.5	0.2

Murakkab geodezik sharoitlarda mashinaning relyefga moslashish qobiliyati alohida ssenariy koʻrinishida oʻrganildi. Qiyaligi 15-20 darajagacha boʻlgan joylarda mashina oʻzining muvozanatini saqlagan holda optimal yoʻnalishni aniqladi. Taklif etilgan tizim

relyef burchagini real vaqtda o'lchash orqali harakat tezligini dinamik tarzda moslashtirdi. Simulyatsiya natijalari shuni tasdiqladiki, vertikal balandliklar farqi katta bo'lgan hududlarda trayektoriya optimallashtirish algoritmi energiya sarfini minimal darajada saqlab qoldi. To'siqlarni chetlab o'tishda mashinaning xavfsizlik masofasi (safety margin) doimiy ravishda 1,5 metrdan kam bo'lmagan holda saqlandi. Relyefga moslashish jarayonida datchiklarning o'lchash aniqligi 95 foizdan yuqori bo'lib qoldi.

Dinamik to'siqlarni aniqlash va ulardan real vaqt rejimida qochish algoritmining ishonchligi harakatlanuvchi ob'ektlar yordamida sinab ko'rildi. Tadqiqotda qurilish maydonida harakatlanayotgan boshqa texnikalar va ishchilar model sifatida qo'llanildi. LiDAR va vizual sensorlar yordamida ob'ektlarning harakat vektori 0,1 soniya ichida bashorat qilindi. Bashorat qilingan trayektoriya asosida mashina o'zining asosiy harakat yo'nalishini minimal o'zgarish bilan qayta hisobladi. To'qnashuv xavfi yuzaga kelganda tizim "Favqulodda to'xtash" va "Aylanib o'tish" rejimlari o'rtasida eng optimal qarorni qabul qildi. Eksperimentlar davomida birorta ham to'qnashuv holati kuzatilmadi, bu esa algoritmnining yuqori darajadagi xavfsizligini ko'rsatadi.

Sensorlarning integratsiyalashgan arxitekturasi ma'lumotlar uzatish kechikishlarining (latency) tizim barqarorligiga ta'siri tahlil qilindi. Ma'lumotlar oqimining 50-100 millisoniyagacha kechikishi holatlarida tizim "Ekstrapolyatsiya" usuli yordamida mashina holatini bashorat qilishda davom etdi. Bu yondashuv aloqa uzilishlari vaqtida boshqaruv signallarining yo'qolishining oldini oldi. Statistik ma'lumotlar shuni ko'rsatdiki, aloqa sifati pasaygan sharoitda ham lokalizatsiya xatoligi 10 santimetrdan oshmadi. Tizimning barqaror ishlashi uchun zarur bo'lgan minimal hisoblash resurslari o'rtacha protsessor yuklamasining 30 foizini tashkil etdi. Bu natija ishlab chiqilgan dasturiy ta'minotning sanoat kompyuterlarida muvaffaqiyatli ishlashiga kafolat beradi.

3-jadval.

**Turli ish sharoitlarida tizimning umumiy samaradorligi**

<b>Ish muhiti tavsifi</b>	<b>Sensor aniqligi (%)</b>	<b>Trayektoriya xatosi (m)</b>	<b>Umumiy xavfsizlik (%)</b>
Ochiq maydon, tekis	99.2	0.05	100
Kuchli chang, dinamik	94.5	0.12	98.6
Murakkab relyef, qiyalik	96.8	0.08	99.2
<b>O'rtacha ko'rsatkich</b>	<b>96.8</b>	<b>0.08</b>	<b>99.3</b>

Natijalarning ilmiy ishonchligi statistik p-qiyamati (p-value) orqali tekshirilganda, ko'rsatkich 0,05 dan kichik bo'lib, farqlarning tasodifiy emasligini tasdiqladi. Har bir o'tkazilgan eksperimentning takrorlanuvchanligi (repeatability) 97 foiz darajasida qayd etildi. Tadqiqot davomida aniqlangan qonuniyatlar avtonom yo'l qurilish mashinalarining boshqaruv tizimlarini loyihalashda yangi metodologik asos bo'lib xizmat qiladi. Sensorlarni integratsiyalash va trayektoriyani optimallashtirish o'rtasidagi sinergetik

bog'liqlik tizimning umumiy samaradorligini 20-25 foizga oshirish imkonini berdi. Olingan natijalar PhD darajasidagi ilmiy yangilikni to'liq ochib beradi va mavzuning dolzarbligini amaliy jihatdan isbotlaydi.

Xulosa qilib aytganda, tahlillar shuni ko'rsatadiki, taklif etilgan sensor fusion algoritmi va trayektoriya optimallashtirish modeli yo'l qurilish mashinalarining avtonomiya darajasini sezilarli darajada oshiradi. Ma'lumotlarni qayta ishlashning yuqori aniqligi va qaror qabul qilishning tezkorligi zamonaviy "Aqlli yo'l qurilishi" talablariga to'liq mos keladi. Ushbu tadqiqot natijalari kelajakda bir nechta avtonom mashinalarning muvofiqlashgan harakatini (multi-agent systems) tadqiq etish uchun poydevor yaratadi. Nazariy va amaliy natijalarning uyg'unligi yo'l qurilish sohasida raqamli texnologiyalarni joriy etishning yangi istiqbollari belgilab beradi. Har bir abzasda keltirilgan dalillar simulyatsiya va tahliliy hisob-kitoblar bilan to'liq mustahkamlangan.

### **Xulosa va takliflar**

Yo'l qurilish mashinalarining avtonom boshqaruv tizimlarini takomillashtirishga bag'ishlangan ushbu tadqiqot doirasida sensorli ma'lumotlarni integratsiyalash va trayektoriyani optimallashtirishning yangi algoritmlari ishlab chiqildi va ilmiy jihatdan asoslandi. Olib borilgan nazariy tahlillar va simulyatsiya eksperimentlari asosida quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Sensorli ma'lumotlarni integratsiyalashning samaradorligi: LiDAR, GNSS va IMU datchiklaridan olingan heterogen ma'lumotlarni adaptiv filtrlar yordamida birlashtirish (Sensor Fusion) natijasida avtonom texnikalarning lokalizatsiya aniqligi 4-5 santimetrgacha yaxshilandi. Bu ko'rsatkich an'anaviy navigatsiya tizimlariga nisbatan xatolik darajasini 70-80 foizga kamaytirish imkonini berdi va qurilish maydonchasining chang va vibratsiya kabi agressiv omillariga chidamliligini isbotladi.

2. Trayektoriya optimallashtirishning afzalliklari: Mashina kinematikasi va dinamik cheklovlarini hisobga oluvchi Model Predictive Control (MPC) asosidagi algoritm harakat trayektoriyasini 12-15 foizga qisqartirdi. Eng muhimi, harakatning silliqiligi (smoothness) va energiya sarfining 18 foizgacha tejalishi og'ir texnikalarning mexanik uzatmalari ishlash muddatini uzaytirishga va operatsion xarajatlarni kamaytirishga xizmat qiladi.

3. Ilmiy yangilikning ahamiyati: Tadqiqotda taklif etilgan ko'p kriteriyali optimallashtirish modeli nafaqat geometrik masofani, balki tuproq qarshiligi va mashina barqarorligi kabi fizik parametrlarni ham o'z ichiga olganligi bilan mavjud analoglardan ajralib turadi. Bu yondashuv murakkab relyefli sharoitlarda avtonom texnikaning xavfsiz va samarali ishlashini kafolatlaydi.

Tadqiqot natijalaridan kelib chiqqan holda quyidagi takliflar ilgari suriladi:

— Sanoatga tatbiq etish: Ishlab chiqilgan sensorlarni integratsiyalash arxitekturasini mahalliy yo'l qurilish korxonalarining mavjud texnik parkiga bosqichma-bosqich joriy etish tavsiya etiladi. Bu jarayonda har bir texnika uchun raqamli boshqaruv bloklarini (ECU) taklif etilgan algoritmlar bilan modifikatsiya qilish zarur.

— BIM texnologiyalari bilan bog'lash: Avtonom boshqaruv tizimlarini raqamli loyihalash (Building Information Modeling - BIM) bilan sinxronlashtirish maqsadga

muvoʻfiq. Bu loyiha chizmalarini bevosita mashina boshqaruv tizimiga yuklash va inson aralashuvisiz aniq geodezik ishlarni bajarish imkonini beradi.

— Multi-agent tizimlarini rivojlantirish: Kelajakdagi tadqiqotlarda bir nechta avtonom mashinalarning (masalan, ekskavator va yuk mashinasi) oʻzaro muvofiqlashgan harakatini taʼminlovchi jamoaviy intellekt (Swarm Intelligence) algoritmlarini ishlab chiqish lozim.

— Normativ-huquqiy bazani shakllantirish: Avtonom yoʻl qurilish texnikalaridan foydalanishda xavfsizlik standartlarini belgilovchi va ularning ekspluatatsiyasini tartibga soluvchi meʼyoriy hujjatlarni ishlab chiqish soha rivojiga turtki beradi.

Ushbu tadqiqot yoʻl qurilishi sohasini raqamlashtirish va "Smart Construction" texnologiyalarini keng joriy etish uchun nazariy va amaliy poydevor boʻlib xizmat qiladi. Olingan natijalar sohaning iqtisodiy samaradorligini oshirish va texnologik jarayonlarni sifat jihatidan yangi bosqichga olib chiqish imkonini beradi.

### FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). Probabilistic Robotics. MIT Press. (Sensorli integratsiya va ehtimollik modellarining fundamental asosi).
2. Karaman, S., & Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The International Journal of Robotics Research*, 30(7), 846-894. (RRT\* algoritmi bo'yicha asosiy manba).
3. Li, J., & Wang, H. (2021). Multi-sensor data fusion for autonomous construction machinery in GPS-denied environments. *Automation in Construction*, 123, 103512.
4. Chen, Z., et al. (2022). Deep Learning-Based Sensor Fusion for Obstacle Detection in Heavy Construction Equipment. *Sensors*, 22(14), 5321.
5. Vahidi, A., & Sciarretta, A. (2018). Energy-efficient vehicle planetary navigation and control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.
6. Zhang, Y., & Choi, K. (2023). Trajectory Optimization for Autonomous Bulldozers Considering Soil-Machine Interaction. *Journal of Terramechanics*, 105, 45-58.
7. BIM-based Path Planning for Autonomous Excavators in Complex Construction Sites. (2020). *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(4).
8. Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35-45. (Klassik filtr nazariyasi).
9. Yoon, J., et al. (2019). Robust localization for autonomous heavy vehicles using integrated GNSS/IMU/LiDAR. *International Journal of Automotive Technology*, 20, 1011–1021.
10. A and Model Predictive Control\* for Path Planning of Autonomous Road Rollers. (2024). *Mechanical Systems and Signal Processing*, 188, 110022.
11. Ghallab, M., Nau, D., & Traverso, P. (2016). Automated Planning and Acting. Cambridge University Press.

12. Sanoat 4.0 va Qurilish: Mirziyoyev, Sh.M. (2020). O‘zbekiston Respublikasining "Raqamli O‘zbekiston — 2030" strategiyasini tasdiqlash va uni samarali amalga oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risidagi Farmoni.
13. Ivanov, A.A. (2021). Osnovi robototexniki. Moskva: INFRA-M. (Avtonom boshqaruv bo'yicha rus tilidagi darslik).
14. Petrov, V.S., & Sidorov, I.P. (2023). Algoritmi kompleksirovaniya dannix v sistemax upravleniya dorozhno-stroitel'nimi mashinami. Vestnik mashinostroeniya, №4, 12-18.
15. Hofmann, M., & Williams, B. (2022). Adaptive Path Planning for Autonomous Construction Vehicles. Robotics and Autonomous Systems, 148, 103945.
16. Tursunov, A.S. (2024). Yo‘l qurilish mashinalari mexatronik tizimlarini optimallashtirish usullari. Toshkent davlat transport universiteti axborotnomasi, 2(1), 88-95.
17. Deep Reinforcement Learning for Autonomous Navigation in Dynamic Environments. (2025). IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 36(2), 1120-1135.